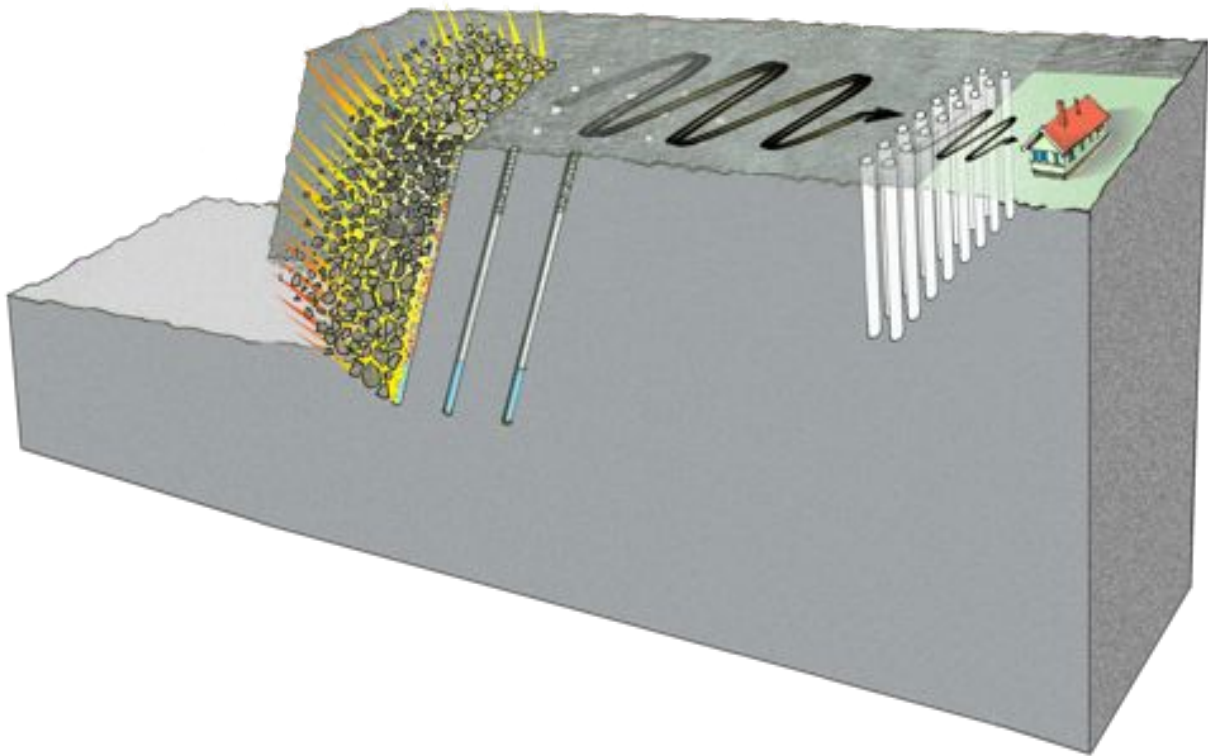


Vibrationsdämpande markfilter för reduktion av markvibrationer vid sprängning i bergtäkter



Slutrapport i projekt 12942

Pontus Thorsson, Akustikverkstan AB

Monica Soldinger Almefelt, Swerock AB

Patrik Höstmad, Avd för teknisk akustik, Chalmers

Lidköping 2015

Förord

Föreliggande pilotprojekt har utförts av följande medlemmar:

Monica Soldinger Almefelt, Swerock

Tekn. Dr. Monica Soldinger Almefelt är chef råmaterialförsörjning grus och berg i Swerock (ingår i Peab-koncernen, som är det största byggbolaget inom Sverige) samt FoU-ansvarig grus och berg och ingår i ledningsgruppen i Region teknik Swerock/Peab asfalt.

Jan Johansson, Bergsprängnings Entreprenörernas Förening/ Voglers

Jan Johansson är produktionschef på Voglers samt är ordförande och styrelsemedlem i BEF – Bergsprängnings Entreprenörernas Förening.

Christian Vogler, Voglers

Christian Vogler är arbetsledare på Voglers Ingenjörbyrå och har mångårig erfarenhet inom sprängbranschen. Christian var bland annat med och genomförde undervattenssprängningarna åt Van Oord vid anläggandet av Norrköpings hamn, och Christian designade och anlade markfiltret som användes i detta projekt.

Pontus Thorsson, Akustikverkstan

Tekn. Dr. Pontus Thorsson arbetar för Akustikverkstan samt är forskare på Avdelningen för teknisk akustik, forskargruppen Vibroakustik, på Chalmers tekniska högskola. Akustikverkstan är ett konsultföretag inom akustik, buller och vibrationer, och som har stor erfarenhet av att kombinera avancerad akustisk modellering med mätningar.

Bo Ronge, Migmatit Geologisk Konsultbyrå

Geolog Bo Ronge är en av landets främsta geologer och arbetar på Migmatit Geologisk Konsultbyrå, som är utför mineral-, malm-, berggrunds- och byggnadsgeologiska undersökningar. Bo har tidigare varit lektor vid Geologiska institutionen på Chalmers tekniska högskola.

Patrik Höstmad, Teknisk akustik, Chalmers tekniska högskola

Docent Patrik Andersson arbetar på Avdelningen för teknisk akustik, forskargruppen Vibroakustik, på Chalmers. Han forskar på många olika aspekter av ljud och vibrationer, bland annat markvibrationer. Målsättningen är att skapa produkter, fordon och miljöer med goda ljud- och vibrationsegenskaper och som har positiva effekter för människors hälsa och välbefinnande.

Björn Toresson, Impakt Geofysik

Björn Toresson äger konsultfirman Impakt Geofysik, som utför geofysiska undersökningar med georadar, slingram, magnetometer, geoelektrisk mätning och seismik.

Förutom projektmedlemmarna har utförandet av projektet varit i fortlöpande kontakt med en referensgrupp bestående av: Nils Rydén (Peab Sverige, Lunds tekniska högskola och KTH), Pär Johnning (NCC), Mathias Jern (Nitro Consult), Lars Jansson (Peab Asfalt) och Jörgen Johansson, Skanska.

Denna rapport är författad av Pontus Thorsson, Monica Soldinger Almefelt och Patrik Höstmad med stor hjälp av övriga projektmedlemmar.

Lidköping i november 2015.

Sammanfattning

Projektet som presenteras i denna rapport har studerat möjligheterna att dämpa markvibrationer från sprängningar med hjälp av luftfyllda hål i berg. Principen är att förändringen i materialparametrar mellan berget och luften i hålen skapar reflektion av vibrationerna. Teoretisk och praktisk litteratur visar på möjligheten att skapa destruktiv interferens mellan de olika reflexerna som kan styras till att dämpa markvibrationerna. Detta projekt har utfört praktiska fältförsök i full skala för att utreda om tekniken är möjlig att använda kring bergtäkter.

De utförda provningarna i verkliga miljöer visar på att det finns möjligheter att dämpa markvibrationer genom att skapa ett metamaterial som består av borrarade hål i berg. Störst effekt får man om man kan skapa tillräckligt stora hål jämfört med vibrationens våglängd. Genom att välja rätt geometri, d v s håldiameter och borrarplan, kan man välja vilka frekvenser där vibrationen ska reduceras.

I de praktiska försöken som genomförts i detta projekt har det visats att man kan simulera stora hål genom att borra mindre hål tätt samman inom en cirkel. Detta är ett mycket viktigt resultat då de relevanta våglängder i bergtäktsammanhang är långa, vilket kräver stora håldiametrar. De simulerade stora hålen i Glimmingen visade på en potentiell dämpning av vertikala vibrationshastigheter med omkring 50 % i frekvensbanden 100-125 Hz. Detta är stora sänkningar som bör undersökas vidare om de kan realiseras praktiskt vid befintlig bergtäkt. Vid bostäder som ligger nära bergtäkter är det vanligt att vibrationshastigheterna har högst värden vid ca 30 – 40 Hz, vilket medför att de simulerade hålen skall vara 2 – 3 gånger större än de som borrarades i Glimmingen. Detta medför grupperingar av borrhål inom cirklar som är omkring 3 m i diameter.

Vidare visade de praktiska försöken att effektiviteten av ett sådant filter måste utvärderas med mätningar i samma punkter före och efter ett filter har konstruerats. Annars finns risk att man attribuerar vågdämpnings- och eventuella vågförstärkningseffekter som sker i berget till filtret. Kort sagt, filtrets effektivitet utvärderas felaktigt.

Innan metoden med markfilter av borrhål kan användas som ett praktiskt hjälpmedel att minska markvibrationer kring bergtäkter måste ett designverktyg skapas som kan hantera alla platsspecifika variabler.

Innehållsförteckning

Vibrationsdämpande markfilter för reduktion av markvibrationer vid sprängning i bergtäkter	1
Förord	2
Sammanfattning	3
Innehållsförteckning	4
1. Bakgrund	5
1.1 Sprängning i bergtäkter	5
1.2 Vibrationsdämpning med metamaterial (markfilter).....	5
1.3 Syfte med projektet	6
2. Kunskapsgenomgång	7
2.1 Metamaterial.....	7
2.2 Multipel spridning	8
2.3 Ljudkristaller (Sonic crystals)	8
2.4 Vågutbredning i bergrund av granit och gnejs	9
3. Beskrivning av provplatser och filterkonstruktioner.....	12
3.1 Styvinge.....	12
3.2 Glimmingen.....	15
4. Mätningar och mätresultat.....	18
4.1 Styvinge.....	18
4.2 Glimmingen.....	31
4.3 Översiktlig beskrivning av designverktyg.....	37
5. Slutsatser	39
Referenser.....	40
Bilaga 1: Styvinge mätpositioner testskott.....	42

1. Bakgrund

1.1 Sprängning i bergtäkter

De allra flesta bergtäkter och gruvor har idag restriktioner gällande vibrationer från sprängning. Dessa värden är lågt satta med hänsyn till den mänskliga upplevelsen, men markvibrationer behöver också begränsas för att undvika skada på egendom. Sprängning är därför, tillsammans med buller och transporter, det som de närboende oftast upplever som mest negativt med bergtäkter.

Vid normal täktverksamhet förekommer pallhöjder från 12 – 25 meter med borrhålsdiameter från 76 – 102 mm (3 – 4 tums borrhålsdiameter). Flera mindre sprängladdningar ger mindre vibrationer än ett fåtal stora, genom att den samverkande laddningsmängden blir mindre. Samverkande laddning är lika med laddningen i ett borrhål när tändplanerna konstrueras så att unika intervalltider skapas. Om markvibrationsnivåerna ska bli lägre så måste traditionellt klenare borrhål (dvs. med en mindre diameter) eller en lägre pallhöjd användas och då krävs ju fler borrhål för att spränga loss samma mängd berg. Detta innebär att borrhålsborrning måste ske under längre tid, och detta är ju den verksamhet i en bergtäkt som oftast bullrar mest. Med andra ord så blir bullerstörningarna större ju lägre markvibrationsnivåer som tillåts. Att borra fler hål är också kostsamt och tidskrävande för företaget. Slitsar i berget är en annan metod för att minska markvibrationerna vid bland annat anläggningsarbeten, detta är dock mycket kostsamt. Det finns därför en stor efterfrågan alternativa metoder för att minska markvibrationsnivåerna och därmed kunna minimera störningarna för omgivningen.

1.2 Vibrationsdämpning med metamaterial (markfilter)

Voglers hade undervattenssprängningarna åt Van Oord (Holländskt företag som bland annat genomför undervattenssprängningar) vid anläggandet av Norrköpings hamn. I detta projekt blev det nödvändigt att minska vibrationsnivåerna och man tog därför snabbt fram en ny metod i form av ett markfilter. Det hela fungerade mycket bra och man kunde undvika skador på befintlig kajanläggning. Syftet med detta projekt är därför att undersöka om denna metod även skulle kunna fungera för bergtäkter.

I Norrköpings hamn användes två parallella hålrader med ett avstånd på 1 meter. Avståndet mellan hålen var 1.50 m och de hade en diameter på 110 mm. Hålraderorna var förskjutna i förhållande till varandra med 0.75 m. Håldjupet var 8 m. Borrningen kan göras med vanligt pallaggregat med 110 mm. Förutsättningen är också att varje hål skall vara luftfyllt för att det hela skall fungera. Detta kan exempelvis lösas genom att hålen fylls med expanderande skummad plast och tätas i topp med cement. Mätningar av Voglers på inkommande vågor inducerade av sprängningen låg på cirka 40 mm/s och efter dämpning med de dubbla borrhålsraderna låg värdena mätta i kajkonstruktionen på 18 mm/s d.v.s. en halvering av värdena i detta specifika fall, vilket innebar att man klarade uppställda maxvärden för kajkonstruktion. Senare bedömningar gjorda av Akustikverkstan AB i Lidköping har verifierat att man med använda håldiameter, hålavstånd och mellanrum mellan hålraderorna nått en mycket bra vågdämpning. Hålavståndet i filtret bestäms av frekvensen på inkommande stötvågor, varför denna måste bestämmas från fall till fall. Frekvensen är beroende på berggrundens materialsammansättning och uppbyggnad med avseende på sprickor och deras riktningar. En liknande metod användes också vid konstruktionen av Ullevi för att minska vibrationsutbredningen under konserter.

1.3 Syfte med projektet

Syftet med det sökta projektet är att under kontrollerade förhållanden göra ett pilotprojekt för att utvärdera hur väl metoden med metamaterial (markfilter) fungerar för att även sänka markvibrationsnivåerna invid bostäder vid sprängning i bergtäkter. Såväl praktiska försök som vetenskapliga studier har tidigare visat att metoden fungerar i andra sammanhang. Metoden är dock oprövad i bergtäktssammanhang. Metoden läggs upp enligt samma princip som i Norrköpings hamn. Metoden överensstämmer med den som används vid seismisk maskering, det vill säga vågorna från sprängningen reflekteras bakåt av markfiltret. Metoden skulle kunna vara till stor nytta för hela branschen då den skulle bidra till att minska störningarna för omgivningen. I sin förlängning skulle detta också kunna bidra till både en mer positiv syn på vår verksamhet och gynna relationen till myndigheter. Resultaten skulle därmed komma såväl närboende som företag till godo. Metoden skulle också kunna användas i många andra sammanhang och branscher.

Ifall pilotprojektet visar att effekten av markfiltret är effektiv även vid sprängning i bergtäkter kan det i framtiden bli aktuellt att gå vidare med ytterligare ett projekt. I detta projekt skulle metoden optimeras med avseende på filtrets dimensionering och placering. Detta kan göras med såväl mer detaljerade teoretiska beräkningar som praktiska experiment. Metoden skulle även kunna komma till användning inom andra användningsområden.

Under projektets gång har justeringar i arbetet behövts göras på grund av de resultat som framkommit. Målsättningen med förändringarna har alltid varit att projektets huvudsyfte skulle uppfyllas.

2. Kunskapsgenomgång

2.1 Metamaterial

Metamaterial är material som är artificiellt framtagna för att skapa egenskaper som (oftast) inte finns naturligt. Materialen består vanligtvis av många objekt som placeras i ett mer eller mindre periodiskt mönster. Den exakta formen, geometrin, storleken och placeringen på objekten påverkar vågor (ljus, elektromagnetiska vågor, ljud, vibrationer, seismiska vågor, etc) på ett sätt som naturliga material inte skulle kunna göra (t.ex. negativ refraktion). Generellt sett har objekten som påverkar vågen mindre dimensioner än våglängden i sig. Materialen kan formges till att skapa olika vågfenomen: reflektion, refraktion, "osynlighetsmantlar" (cloaking), mm.

Seismiska metamaterial är metamaterial som vanligtvis är utformade för att motverka de negativa effekterna av seismiska vågor på byggda strukturer (till exempel hus). Forskare från Institut Fresnel i Marseille (Franskt forskningslaboratorium inom fälten fotonik, elektromagnetism, signal och bildanalys) och företaget Menard (Franskt geotekniskt entreprenörsföretag) utförde nyligen storskaliga tester av "seismic cloaking" (seismisk maskering) (Brulé *et al* 2014). Syftet var att undersöka hur byggnader kan skyddas från seismiska vågor vid jordbävningar. Den metamaterialbaserade maskeringen bestod av en samling omsorgsfullt utplacerade fem meter djupa borrhål, se Figur 1. Systemet av borrhål (maskeringen) visades omdirigera de seismiska vågorna så väl att akustiska sensorer bortom den andra raden av borrhål knappast kunde detektera något alls. Utmaningarna ligger i att eftersom vågorna reflekteras tillbaka så ökar de framför maskeringen, samt att markförhållanden och vågornas egenskaper påverkar hur maskeringen ska utformas.



Figur 2.1: Seismisk maskering (bild från Brulé *et al*, 2014).

Effektivitet av borrhål nära sprängningar har också studerats av Congshi *et al* som i simuleringsförsök visat att en enkel rad av cirkulära hål kan minska vibrationshastigheten både longitudinellt och vertikalt med ca 10 % (Congshi *et al* 2015).

2.2 Multipel spridning

Spridning innebär att ett objekt sprider vågenergi i olika riktningar när en vågfront träffar objektet. Multipel spridning, till skillnad från bara spridning, innebär att det förekommer någon form av interaktion via vågutbredning mellan flera spridande objekt. Multipel spridning har studerats inom bland annat optik, marinteknik, akustik, mekanik och geodynamik. I följande stycke görs en kort genomgång av de metoder som utvecklats för att lösa denna typ av problem. Fokus är på de historiskt avgörande publikationerna medan de efterföljande utvecklingarna och tillämpningarna undvaras av utrymmesskäl.

En av de första texterna om företeelsen går att hitta år 1893 då Heaviside presenterade en kvalitativ beskrivning. 20 år senare presenterad Závisk en exakt lösning för spridning från en oändligt lång rad av spridande cylindrar (Závisk, 1913). Han använde variabelseparering som lösningsmetod. Twersky identifierade tre metoder för att lösa multipla spridningsproblem (Twersky, 1960) genom att bestämma integralekvationen för en uppsättning spridande objekt, genom en iterativ procedur som Twersky utvecklat och genom den variabelsepareringsmetoden som Závisk använt. Dessa metoder ger analytiska eller semi-analytiska lösningar men i praktiken måste lösningen av ekvationerna ske numeriskt för typiska problem med någorlunda komplex geometri. En generell metod för variabelseparation utvecklades av Peterson och Ström (Peterson och Ström, 1974) baserat på Watermans arbete för ett enda spridande objekt (Waterman, 1969).

2.3 Ljudkristaller (Sonic crystals)

Ett metamaterial som har en periodisk fördelning av spridande objekt brukar inom akustiken kallas för ljudkristaller (sonic crystals). Gittret kan t.ex. bestå av periodiskt ordnade cylindrar. Funktionen hos gittret kan delas upp i två olika frekvensområden:

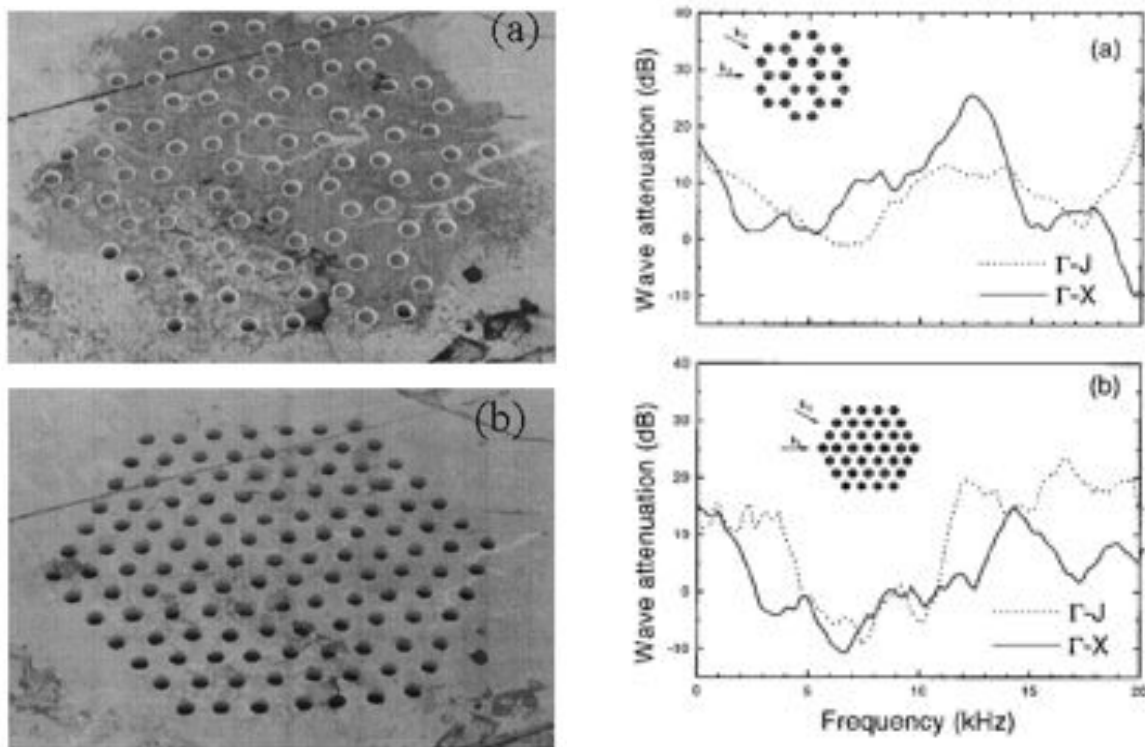
1. Ett lågfrekvensområde där våglängden är mycket större än avståndet mellan centrum av de spridande objekten (gitteravståndet).
2. Högfrekvensområde där våglängden är av samma ordning eller mindre än gitteravståndet.

I lågfrekvensområdet är det nära ett linjärt förhållande mellan frekvens och vågtal, och dispersionen av det periodiska systemet stämmer därför överens med dispersionen för en plan våg som utbreder sig i fria rymden. Vågutbredning i lågfrekvensområdet genom sådana strukturer kan karakteriseras genom att använda ekvivalenta/effektiva materialegenskaper.

Kristallstrukturens detaljer är desto viktigare för kortare våglängder vid högre frekvenser och de påverkar dispersionsrelationen. Övergången från lågfrekvensbeteende till högfrekvensbeteende sker gradvis. I högfrekvensområdet framträder passband och stoppband som beror på vågutbredning medges genom strukturen eller ej. Vågamplituden minskar kraftigt vid särskilda frekvenser som beror på avståndet mellan objekten i gitterstrukturen. Det kan förklaras med att det uppstår destruktiv interferens mellan den inkommande vågen och de vågor som reflekteras inne i kristallen. Fenomenet brukar kallas Bragg-interferens och Bragg-reflektion efter Lawrence Bragg som la fram en relation som beskriver hur strålning reflekteras i en kristall – den så kallade Braggs lag (Wolfe, 1998).

Praktiska försök av vågpåverkan av ljudkristaller har utförts i ett marmorbrott av Meseguer et al (Meseguer *et al*, 2009). I försöken borrades två olika mönster med 160 cm djupa borrhål med 6 cm diameter, se vänstra delen av figur 2.2. Vågdämpningen av mönstrena utvärderades

sedan med hjälp av mätningar av den vertikala vibrationskomponenten från slag på marmorytan av en stålkula med 0,5 cm diameter. De rapporterade vågdämpningarna (se högra delen på figur 2.2) visar på tydliga stoppband där man får hög dämpning, men de gäller dock bara för höga frekvenser. Detta gör det svårt att använda resultaten direkt i bergtäktsammanhang där låga frekvenser normalt är de viktigaste. De höga frekvenserna dämpas normalt bort av intern friktion i berget, t ex genom sprickor och ändringar av bergkvaliteten.



Figur 2.2: Två mönster med borrarade hål i marmorbröttet (bild från Meseguer et al, 2009).

En liknande metod att dämpa markvibrationer är att gräva smala diken eller att gräva ner luftfyllda mattor (Di Mino *et al*, 2009, Massarsch, 2005). Slitssågning är ett annat exempel på detta. Den metoden bygger dock bara på att förändra utbredningsmediets mekaniska egenskaper på så sätt att man får reflektion i gränsskiktet mellan mark och luft. Det är inte att betrakta som ett metamaterial på samma sätt som borrarade hål i ett annars homogent medium.

2.4 Vågutbredning i berggrund av granit och gnejs

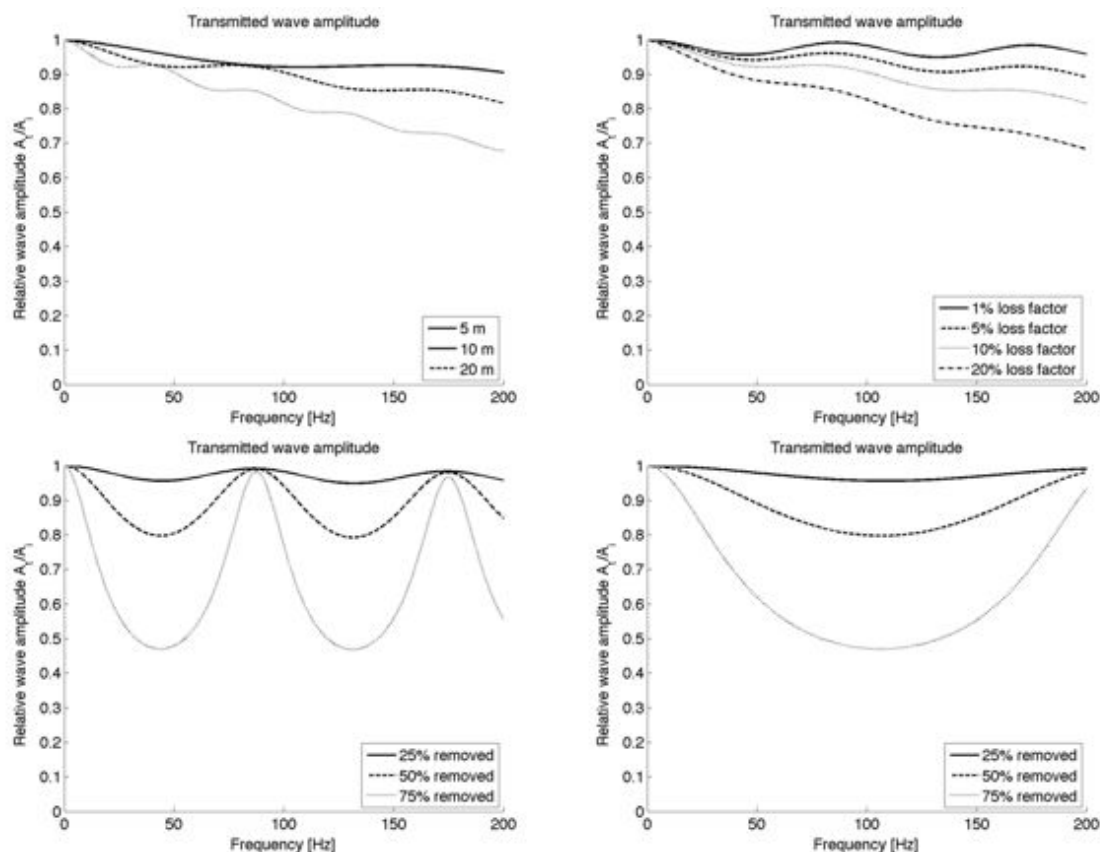
Vi gör en grov uppskattning av vågutbredningshastigheten för att få fram typiska dimensioner för Rayleighvågens våglängd som kan vara av intresse vid sprängning i bergtäkter med berggrund av granit eller gnejs. Vågutbredningshastigheten för kompressionsvågen i granit och gnejs är i storleksordningen 4000–4750 m/s, skjuvvågen i storleksordning 2000–2500 m/s och Rayleighvågen ca 90% skjuvvågen (Möller, 2000). Det intressanta frekvensområdet för rörelse i markytan vid sprängning i bergtäkter är vanligtvis under 100 Hz, vilket skulle motsvara vågor som är längre än 18–45 m. Vid 10 Hz är våglängden ca 180–450 meter.

Som ett teoretiskt/numeriskt exempel har ett metamaterial för seismiska vågor i berggrund med hastigheten 3000 m/s och frekvenser upp till 10 Hz dimensionerats. Det består av cylindrar med diameter 300 m och ett gitteravstånd av drygt en kilometer (Alagoz, 2011).

Cylindrarna står i nio rader i en triangulär struktur. Generellt blir reduktionen i gittret stort då våglängden är 1500–3000 m, dvs. något större än gitteravståndet. Men även för våglängder upp mot 5000 m fås ner mot 50% reduktion av tryckamplituden. För en honeycombstruktur eller triangulär struktur med ellipser fås en stor reduktion även vid kortare våglängder (högre frekvenser) men samtidigt stor genomsläpplighet för våglängder något kortare än gitteravståndet. Det ska noteras att upplösningen av våglängd (frekvens) är grov i de redovisade resultaten varför resonanstoppar och andra detaljer kan ha förbisetts.

Skalar vi detta till våra vågutbredningshastigheter, frekvenser och våglängder skulle exemplet motsvara cylinderdiametrar i storleksordningen 20–100 m och ett gitteravstånd av 75–400 m. Detta är orealistiska storlekar och man får därför studera även effekter av förändrade makroparametrar, såsom förändrad styvhet och densitet när betydande mängd bergmaterial tas bort ur berget, t ex med hjälp av borrhål.

De långa våglängderna gör det högst troligt att vi kommer att behöva dimensionera för ett filter i lågfrekvensområdet där problemet löses genom en uppskattning av effektiva materialegenskaper. Skattningar av hur stora effekterna kan bli visas i figur 2.3, där de representeras av överförd vågamplitud (Transmitted wave amplitude).



Figur 2.3: Uppskattning av vågdämpning (transmissionsförluster) för olika materialparametrar.

Ju lägre den överförda vågamplituden är desto större dämpning har man. I den övre grafen till vänster visas inverkan av längden av ett material med 25 % sänkt densitet och oförändrad styvhet. I den övre grafen till höger visas inverkan av intern dämpfaktor för ett 10 m långt gränsskikt med 25 % lägre densitet och oförändrad styvhet. I den nedre figuren till vänster visas inverkan av borttagning av olika mängd material ur en bergmassa. I alla dessa tre grafer

är våghastigheten satt till 1750 m/s, vilket är lågt för normalt berg. Den nedre grafen till höger visar också effekten av mängden borttaget material, men för våghastigheten 4250 m/s, vilket är mer realistiskt för berg. Slutsatsen av alla graferna i figur 2.3 är att man måste göra mycket stora förändringar i bergmaterialet för att få några som helst vågdämpningar.

3. Beskrivning av provplatser och filterkonstruktioner

I detta pilotprojekt har Swerocks täkt i Styvinge nära Linköping, Östergötland och NCC:s täkt i Glimmingen nära Uddevalla, Västra Götaland använts för att utvärdera hur väl metoden med metamaterial (markfilter) fungerar för att sänka markvibrationsnivåerna vid sprängning i bergtäkter. Dessa två platser presenteras kortfattat nedan.

3.1 Styvinge

Styvingetäkten har valts ut dels för att projektgruppen har god kontakt med ansvariga för täkten, och dels för att kontoret utgörs av ett gammalt bostadshus. Kontoret bedömdes därmed som ett representativt mätobjekt, även om det ligger nära den aktuella brytfronten. Detta gör att markvibrationerna blir förhållandevis höga och effekten av markfiltret därmed tydligt mätbart. Det korta avståndet gör också att osäkerheter gällande markförhållanden minimeras, särskilt som området är avbanat. Under genomförandet visade det sig dock att filtret inte var praktiskt möjligt att förlägga så att det skulle skydda kontoret, utan det fick förläggas till annan plats inom täktområdet. Figur 3.1 visar en flygbild över området där kontoret samt brytfronten är utmarkerat.

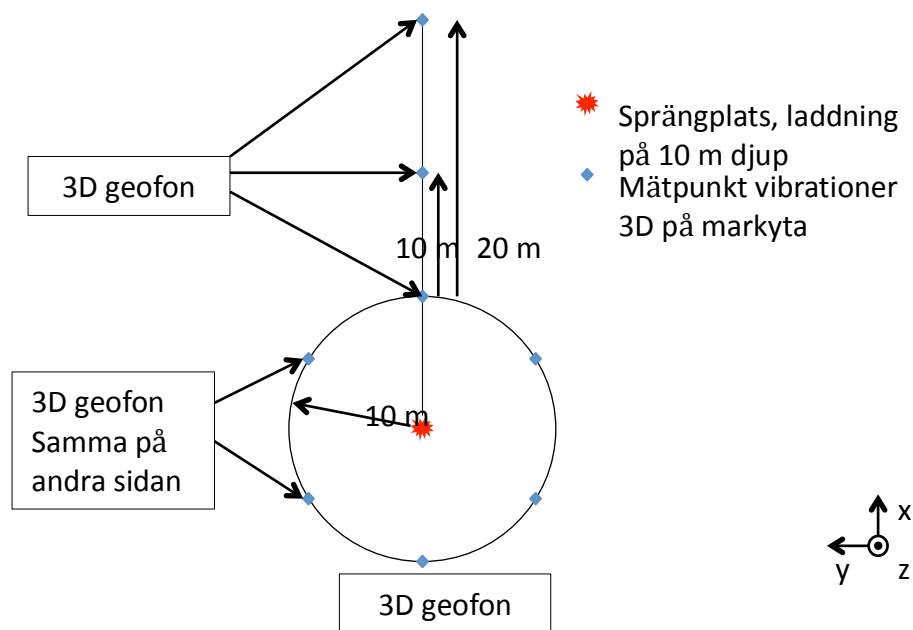


Figur 3.1. Placering av kontor och nuvarande brytfront i Styvingetäkten.

Sonderande mätningar av bergkvaliteten utfördes 2014-09-04 med små, enstaka laddningar i borrhål på 6-10 m djup. Vid mätningarna placerades geofoner som mätte vibrationshastigheter i tre dimensioner på en cirkel med 10 m radie från spränghålet, se figur 3.2. Två extra geofoner placerades på 10 respektive 20 m avstånd från cirkeln i riktningen parallellt med huvudsprickorna i berget på platsen. Mätuppställningen valdes för att testa om utbredningshastigheterna i berget var lika åt alla håll. Inmätta positioner för alla borrhål och mätpositioner finns i Bilaga 1: Styvinge mätpositioner testskott. I samma bilaga finns PSD-spektrum för mätsignalerna, och dessa var svåra att utläsa några kvalitativa slutsatser ifrån. De uppmätta våghastigheterna för P-vågor låg omkring 5,0 km/s, men med standardavvikelsen 0,6 km/s för de olika mätpunkterna. Tillsammans med spektrana i Bilaga 1 innebär detta att

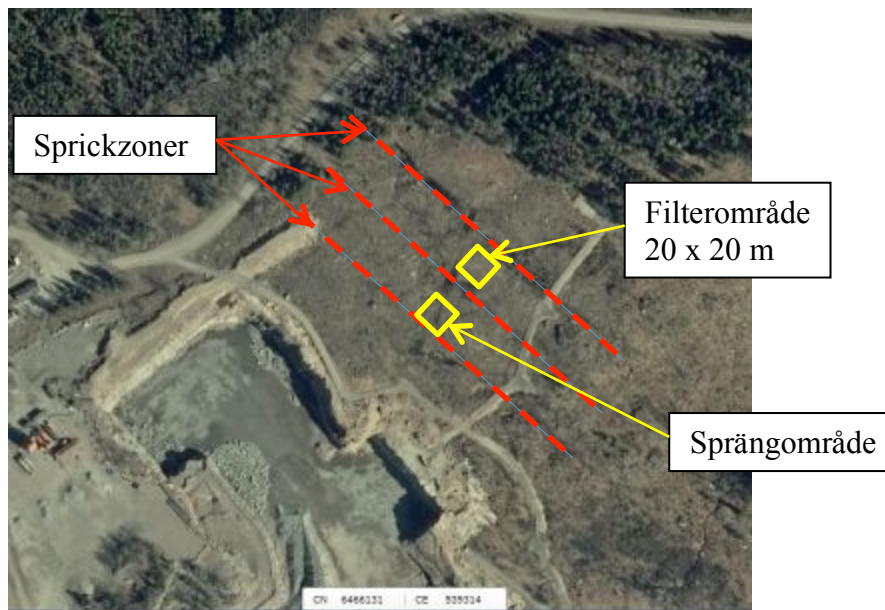
vågutbredningen sker på starkt varierande sätt i de olika riktningarna, d v s berget som vågmedium är starkt inhomogent. Utvärderingar av filtrets verkan bör således enbart göras med mätpunkter precis i närheten av filtret.

De sonderande mätningarna utfördes av medlemmar i projektgruppen. Den utrustning som användes visade sig dock få problem med mätprecisionen för vibrationer i horisontalld då geofoner på stålspekt användes. Vid vissa frekvenser fås starka egensvängningar av geofonkroppen på den fjäder som stålspektet kan liknas med i horisontalld. I vertikalld fanns inte samma problem, då stålspektet är betydligt styvare i den riktningen, vilket medför att eventuella egenfrekvenser flyttas uppåt i spektrat till så höga frekvenser att de är utanför projektets intresseområde (>1 kHz).



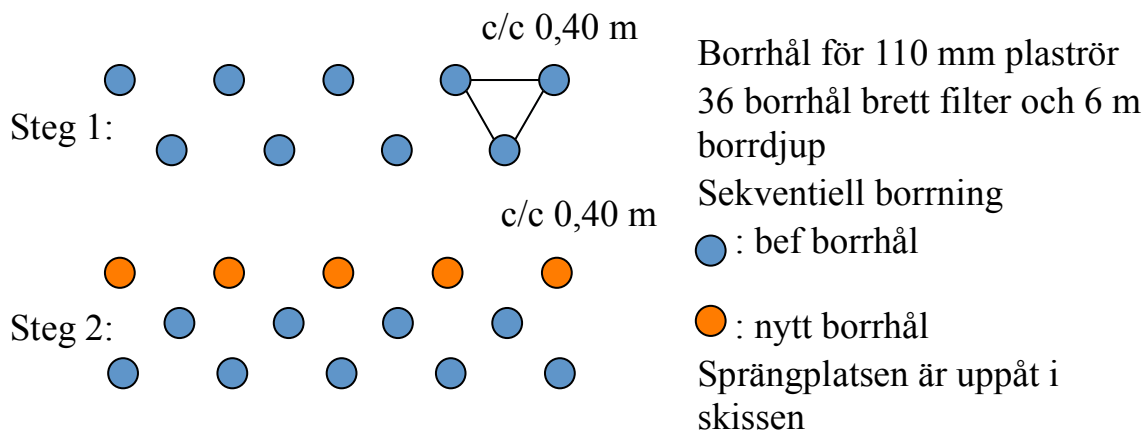
Figur 3.2: Teoretisk mätupställning för att testa vågmediets (bergets) egenskaper, Styvinge.

Figur 3.3 visar filtrets placering i tåkten. I tåktområdet är den dominerande sprickriktningen i nordväst – sydöst. Det var inte möjligt att få plats med sprängplats och filter med tillhörande mätpositioner mellan två sprickzoner. Framförallt då Rayleigh-vågorna blir den dominerande vågtypen först på lite längre avstånd från sprängningen. Placeringen av filtret bestämdes också baserat på var produktionssprängningarna skulle göras i den närmaste framtiden. Produktionssprängningarna skulle göras i den i figur 3.3 påbörjade fyrkantiga insprängningen rakt söder om sprängområdet.



Figur 3.3: Placering av sprängområde samt filterområde i Styvinge.

Innan projektet påbörjades fanns endast det praktiska försök som Voglers utförde i Norrköpings hamn. Därför var det naturligt att konstruera ett liknande filter för att se om effekten som uppmättes i Norrköpings hamn kunde upprepas. Därefter byggdes filtret på med en extra rad borrhål för att se hur vågtransmissionen genom filtret förändrades. De prövade filtrena kan ses i Figur 3.4. Figur 3.5 visar bilder från den konstruktionen av filtret på platsen. I Styvinge trycktes 110 mm markavloppsrör med tätade ändar ner i hålen. För att filtret ska fungera ordentligt måste hålen vara fyllda med luft, då skillnaden i material är det som skapar reflektion av vibrationsvågor.



Figur 3.4: Valda filterkonstruktioner i Styvinge.

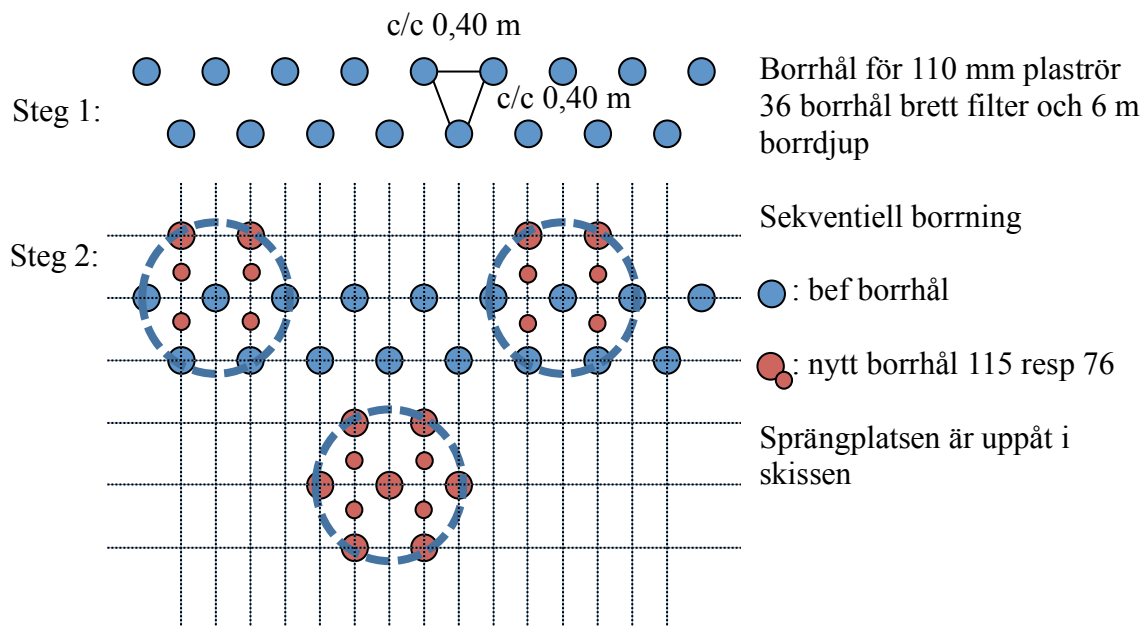


Figur 3.5: Fotografier från konstruktionen av markfiltret. I fotografiet till höger ses det färdiga Steg 2-filtret.

3.2 Glimmingen

Täkten i Glimmingen valdes ut då erfarenheten från Styvinge visade att det behövs större avstånd mellan sprängning och filter för att få relevanta mätresultat. I Glimmingen kunde man dessutom ha god planering av framtida produktionssalvor vilket gjorde att filtrets placering kunde väljas bättre. Någon flygbild för takten Glimmingen fanns inte tillgänglig vid denna rapports färdigställande.

De valda filterkonfigurationerna kan ses i figur 3.6. Samma filter med två rader som användes i Styvinge repeteras även här för att bättre förankra dess effektivitet. Erfarenheterna från Styvinge visade också att filtren behöver ha större håldiameter för att kunna fungera som ett metamaterial, som potentiellt skulle kunna bryta vibrationsvågorna. Att borra hål med en diameter på ca 1 m är varken ekonomiskt eller praktiskt rimligt, framför allt inte för en framtida användning i en bergtäkt. Därför valdes att försöka simulera stora hål genom att borra många mindre hål inom en cirkel. Ett speciellt mönster diskuterades därför fram med Voglers som är praktiskt realiserbart, och det visas som steg 2 i figur 3.6. I Glimmingen användes inga markavloppsrör utan filtrets hål blåstes ur med tryckluft innan varje mätning så att alla hål var fyllda enbart med luft.



Figur 3.6: Valda filterkonfigurationer för fullskaleförsöken i Glimmingen.



Figur 3.7: Filtret med två rader borrarat. På bilden syns också de två mäpositionerna bakom filtret som grå lådor.

Sprickbildningen i berget kring Glimmingen går även här i nord – sydlig riktning men så tätt att man inte kan förvänta sig att alla hålen i filtret hamnar på samma platta. Därför orienterades filtret istället för de förväntade positionerna för framtida produktionssprängningar. Ett fotografi som visar sprickbildningen kan ses i figur 3.8.

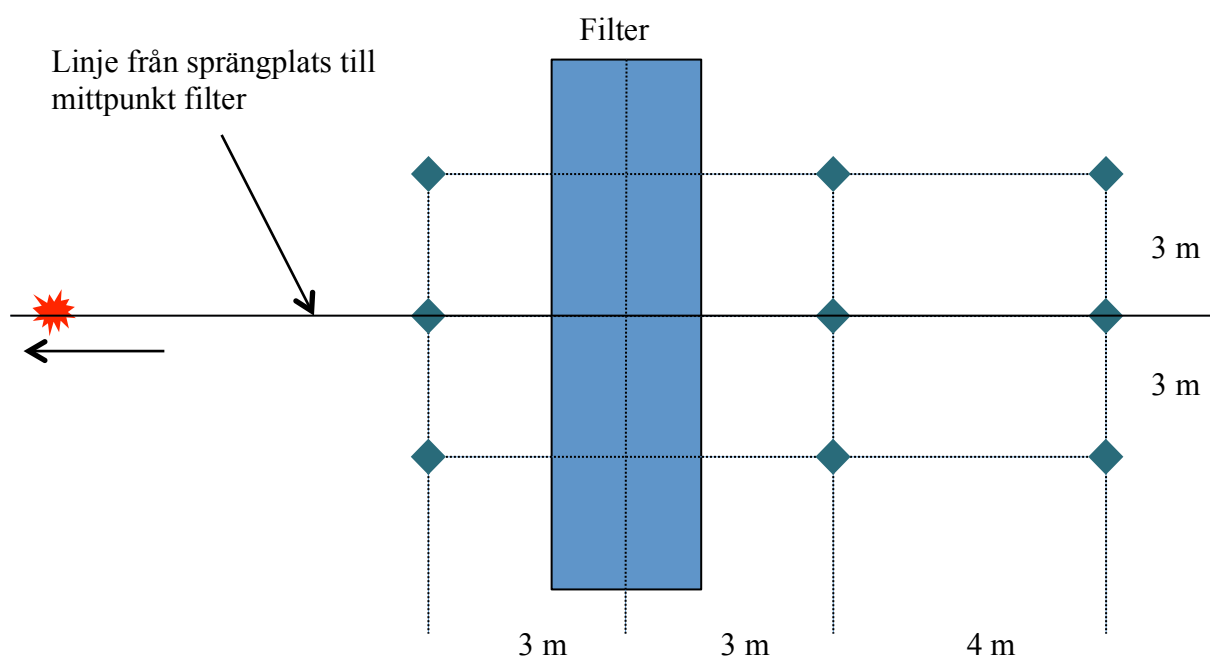


Figur 3.8: Fotografi över mätplatsen som visar sprickriktningar i berggrunden.

4. Mätningar och mätresultat

4.1 Styvinge

I Styvinge valdes att mäta i totalt nio mätpunkter, se figur 4.1. Tre vibrationsgivare placerades innan filtret och två rader om tre givare placerades bakom filtret enligt figuren. Tre givare valdes att ha i varje rad för att kunna använda medelvärden för flera transmissionsvägar genom berget och därigenom kunna undvika mycket lokala transmissionseffekter. Mätningar gjordes för både steg 1 och steg 2 med tre enkelskott med 1 kg booster i ett 4 m djupt hål 26 m framför filtret. Dessa mätningar gjorde 2014-12-10 och 2014-12-11. För filtret i steg 2 gjordes också mätning med produktionssalva 2015-02-18. Alla mätningar gjordes av Nitro Consult, Norrköping, med utrustning som spelade in hela vibrationsförloppet. I rådatafilerna till mätningarna finns uppgifter om mätinstrumentens typ, serienummer och senaste kalibrering. Då denna rapport fokuserar på värdering av markfiltrets effektivitet upprepas inte instrumentuppgifterna här utan kan plockas fram vid behov.



Figur 4.1: Vald mätuppställning för mätningarna i Styvinge.

De inspelade vibrationsförloppen har sedan utvärderats i för projektet specialskrivna Matlab-program för att kunna studera filtrets effektivitet i olika frekvensband. I utvärderingarna har tredjedels oktavband använts med centerfrekvenser mellan 10 Hz och 500 Hz. Lägre frekvenser är inte intressanta i dessa provningar, även om de kan vara det i många praktiska fall. De geofoner som användes vid dessa mätningar, Sigicom Infra V12, ger bara trovärdiga mätresultat upp till 500 Hz. Filtrena som använts för filtrering i tredjedels oktavband uppfyller kraven för typ 1 enligt IEC 61260-1:2014.

Enstaka ljud- eller vibrationshändelser utvärderas ofta med olika integrationstider. Det valda utvärderingssättet (från inspelade vibrationssignaler) gör att man kan studera om integrationstiden påverkar filtrets effektivitet, vilket kan ha inverkan på framtida användning av metoden genom att vibrationskraven kring bergtäkter är formulerade baserat på en viss integrationstid. Därför har filtrets egenskaper studerats med tidskonstanterna I (Impulse), F (Fast) och ekvivalent (medelenergi). Detta visas tydligt i Figur 4.2 där filtrets

transmissionskoefficient (se förklaring nedan) utvärderats med de valda integrationstiderna. Endast små skillnader kan spåras mellan de olika graferna. Tidskonstanten (integrationstiden) visar alltså endast på små skillnader; vad gäller filtrets egenskaper har valet av tidskonstant därför mindre betydelse. Samma utvärdering gjordes också för filtret med tre rader, och resultaten blev liknande vilket gav samma slutsats. Utvärdering vid salvsprängning gav för övrigt samma slutsats.

Många bergtäkter har begränsningsvärdet för vibrationer angivet som toppvärde (Peak). Detta innebär signalens högsta värde utan integration, d v s integrationstiden är noll. Ska man utvärdera egenskaperna hos en signal i olika frekvensband är det inte lämpligt att använda toppvärde, då det ger starkt varierande och därför svårtolkbara resultat. I det aktuella projektet är slutsatser kring filtrets egenskaper för olika frekvenser av central betydelse och därför har inte toppvärdet använts. I alla resultat som presenteras i denna rapport används istället integrationstiden Impulse, då den representerar ett stabilt resultat samtidigt som det är den kortaste standardiserade integrationstiden.

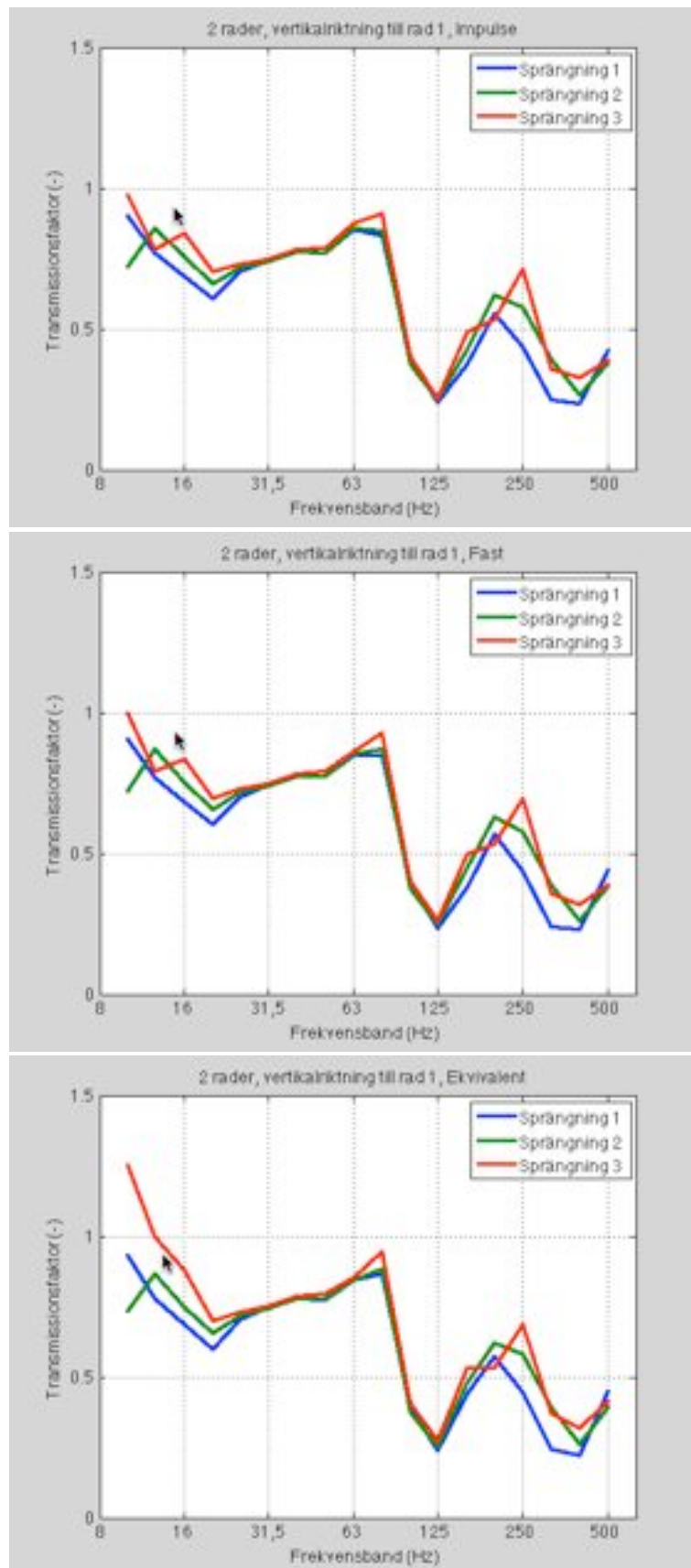
Frekvensberoende på filtret hänger ouppslösligt samman med funktionen som metamaterial. Som kunskapsgenomgången i kapitel 2 visat på finns de vibrationsdämpande egenskaperna troligtvis inom ett begränsat frekvensband, och då är det mycket viktigt att kunna dra slutsatser baserat på värden i olika frekvensband.

Filtrets egenskaper har i Styvinge utvärderats genom att beräkna transmissionskoefficienten mellan hastigheterna framför och bakom filtret i tredjedels oktavband. På så sätt kan markfiltrets frekvensegenskaper synliggöras. På detta sätt kompenserar man inte för att mätpunkterna bakom filtret ligger längre bort än de framför, d v s filtrets egenskaper är inte kompenserade för avståndet. Detta gör att den uppmätta dämpningen är högre än om man hade kompenserat för avståndet. Man skulle kunna använda teoretisk kompensation för ett homogent utbredningsmedium, men eftersom vi vet att berget i Styvinge inte beter sig om ett homogent medium innebär det i sig risker att förvanska resultaten. Risken för överskattning av dämpningen kan dock värderas genom att studera egenskaperna för riktigt låga frekvenser, d v s för frekvenser där filtret inte alls kan fungera som ett metamaterial. Där bör filtret inte påverkas alls, d v s transmissionskoefficienten böra vara 1.

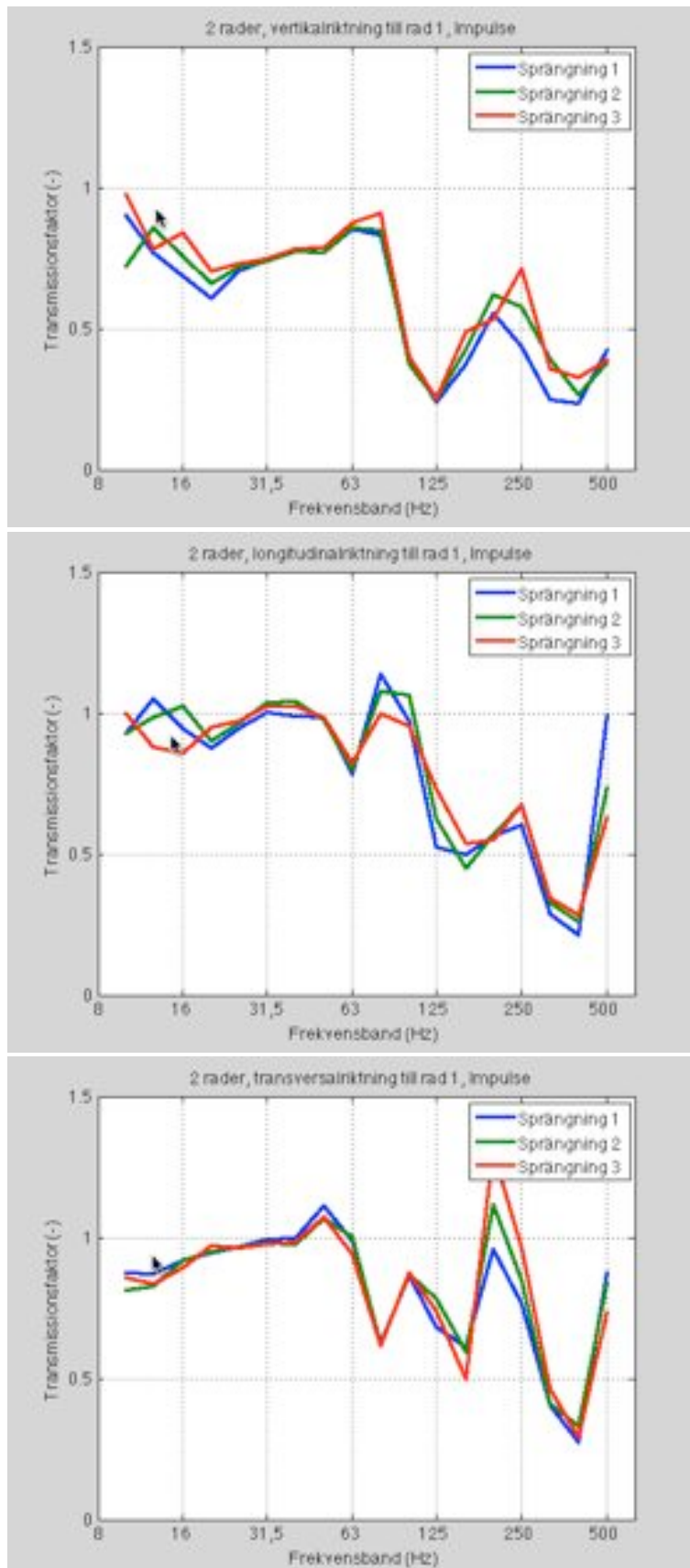
Figur 4.3 visar uppmätta transmissionskoefficienter för filtret med 2 rader (steg 1 enligt filterförslagen i figur 3.4) till första raden bakom för var och en av de tre enkelskotten. På samma sätt visas resultaten för andra raden bakom filtret i figur 4.4 för var och en av de tre enkelskotten. Följande slutsatser kan göras från resultaten:

- Transmissionskoefficient blir lägre än 1 vid låga frekvenser, vilket tyder på dämpning men om man normerar med roten ur avståndet, vilket är ett vanligt avståndsberoende, blir det nära 1.
- Dämpning kan ses för frekvenser över 80 Hz, men till största delen är detta troligtvis dämpning i sprickor då inget händer när man lägger till en tredje rad i filtret
- Möjlig filterverkan kan spåras vid 200-250 Hz då man ser en tydlig sänkning när en tredje rad i filtret läggs till.

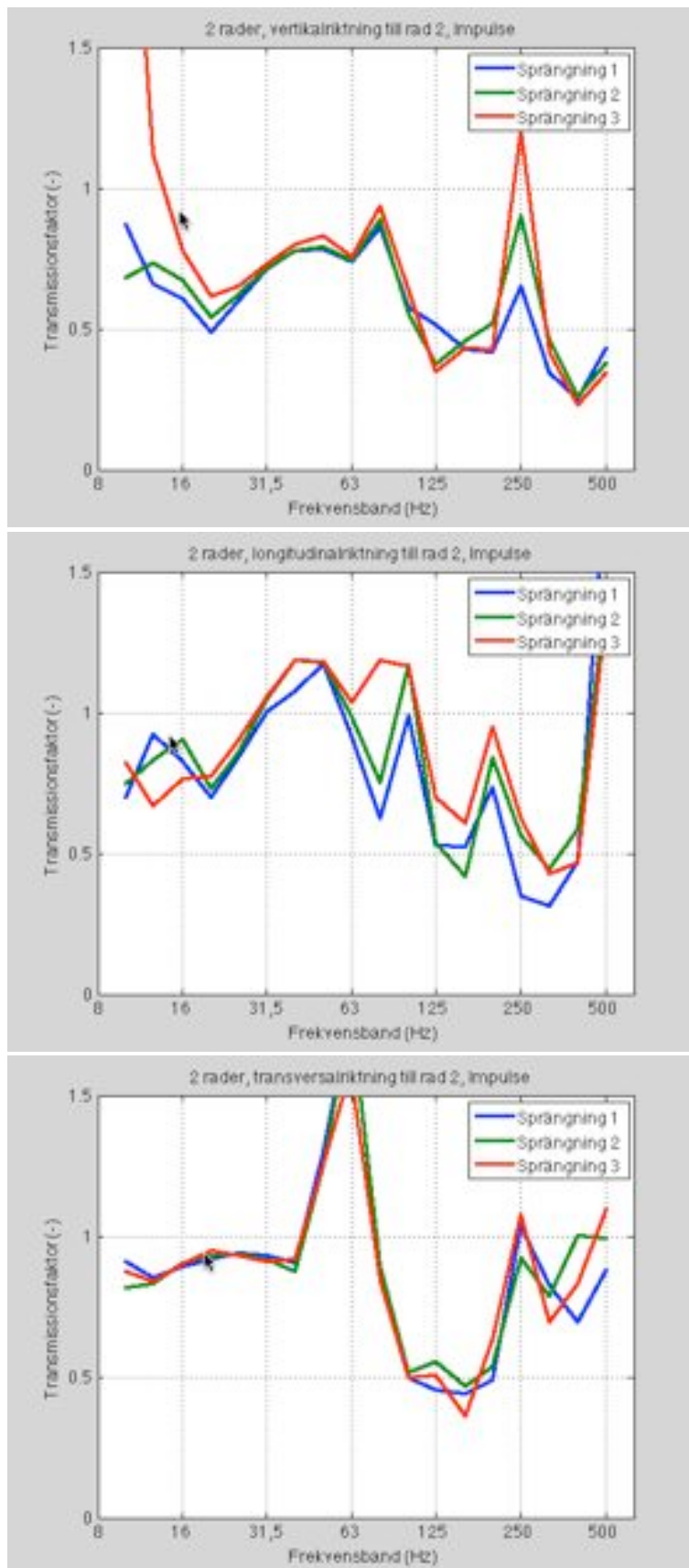
I figur 4.5 visas uppmätta spektrum för vibrationshastigheten i raden innan markfiltret för de tre enkelskotten. Där är det tydligt att vibrationen som kommer fram till markfiltret har tillräckliga nivåer för att kunna tro på transmissionskoefficienten mellan 20 Hz och 400 Hz. De kraftiga variationerna mellan sprängningarna som kan ses i de allra lägsta frekvensbanden (10-16 Hz) beror således på dåligt signal till brusförhållande.



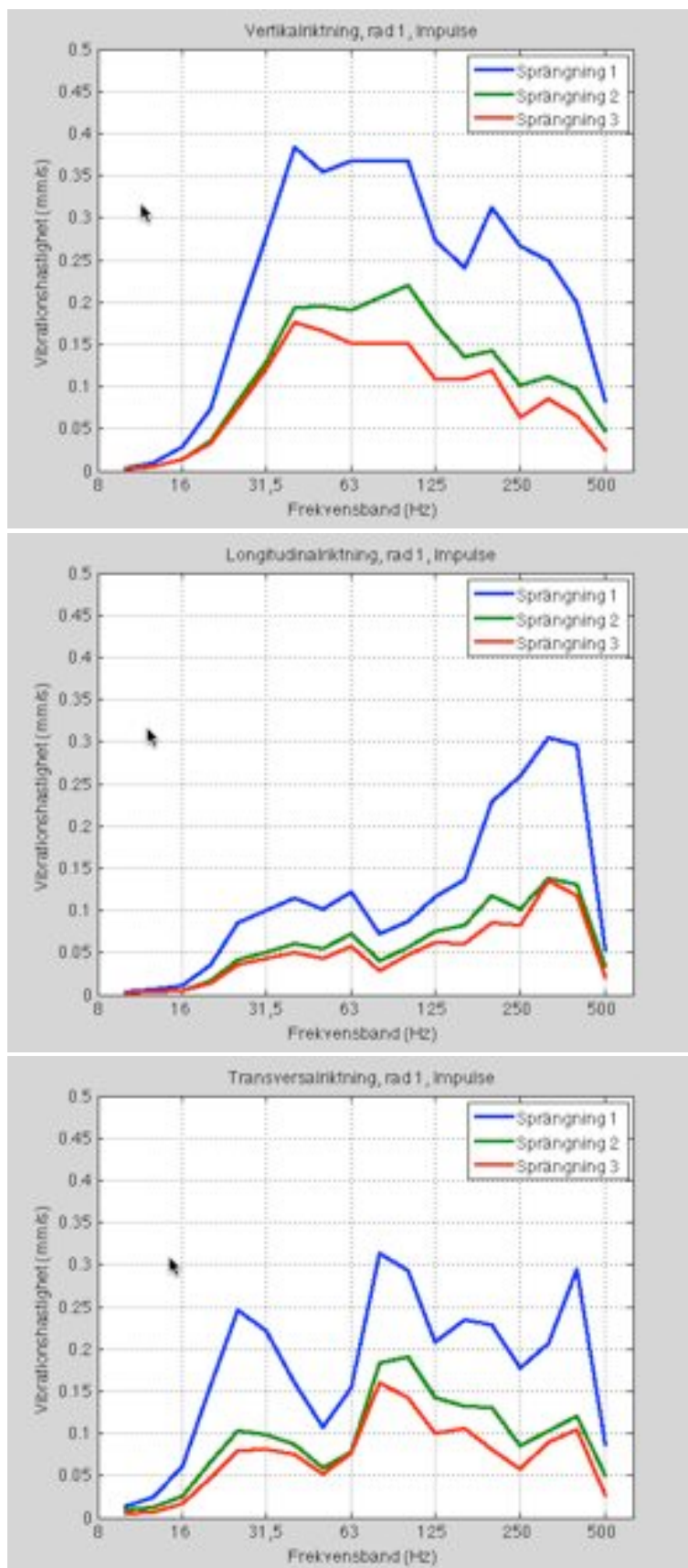
Figur 4.2: Utvärdering av transmissionskoefficienten för olika integrationstider av signalerna, filter med två rader.



Figur 4.3: Uppmätt transmissionskoefficient till första raden bakom markfiltret med två rader för olika vibrationsriktningar.

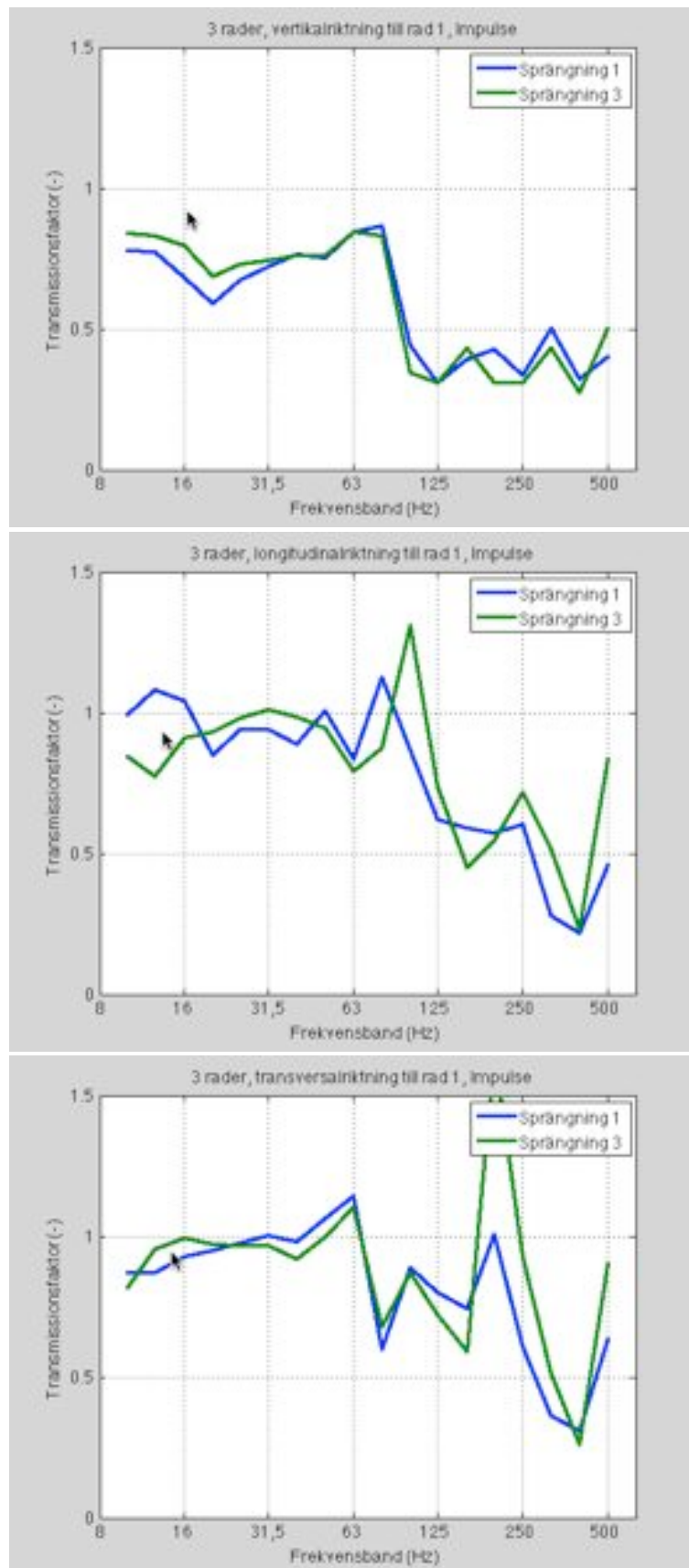


Figur 4.4: Uppmätt transmissionskoefficient till andra raden bakom markfiltret med två rader för olika vibrationsriktningar.

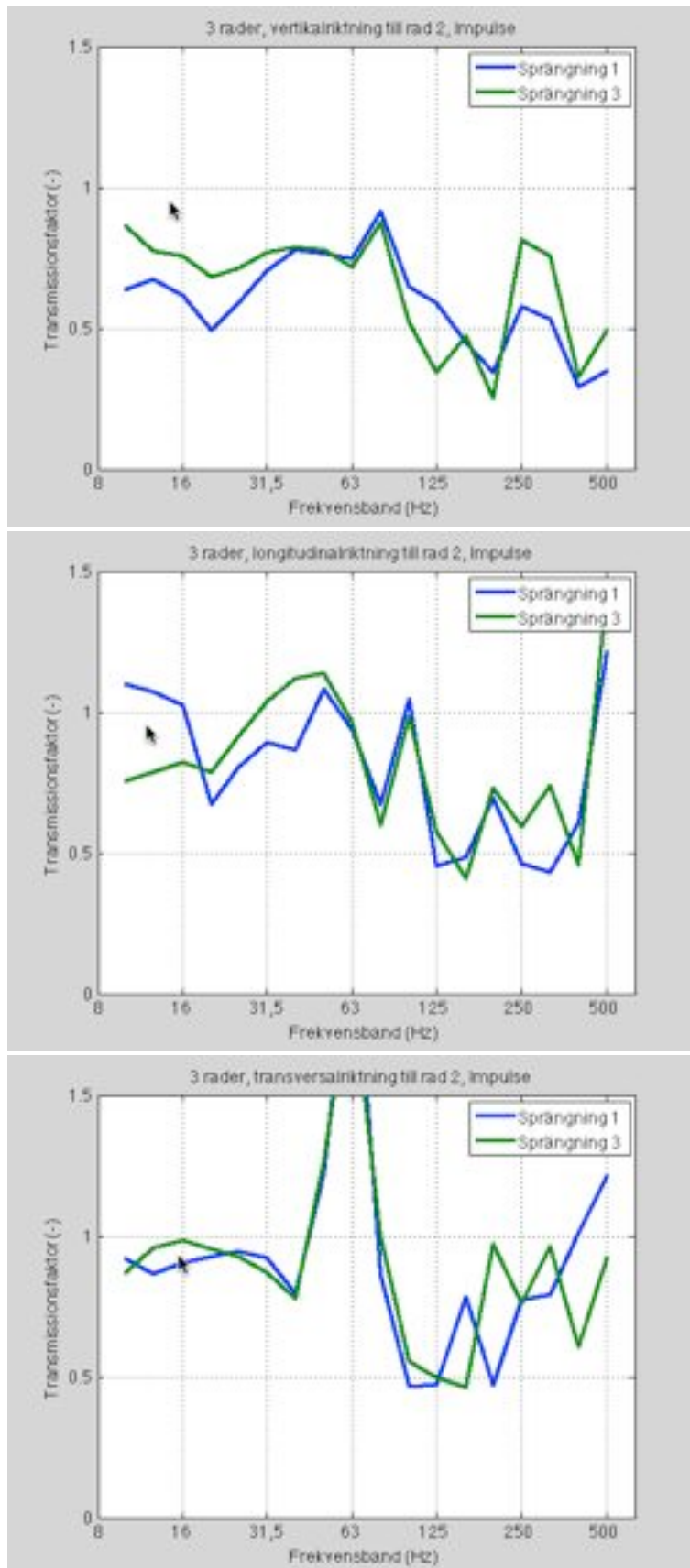


Figur 4.5: Uppmätta spektran för vibrationshastigheten framför markfiltret med två rader för olika vibrationsriktningar.

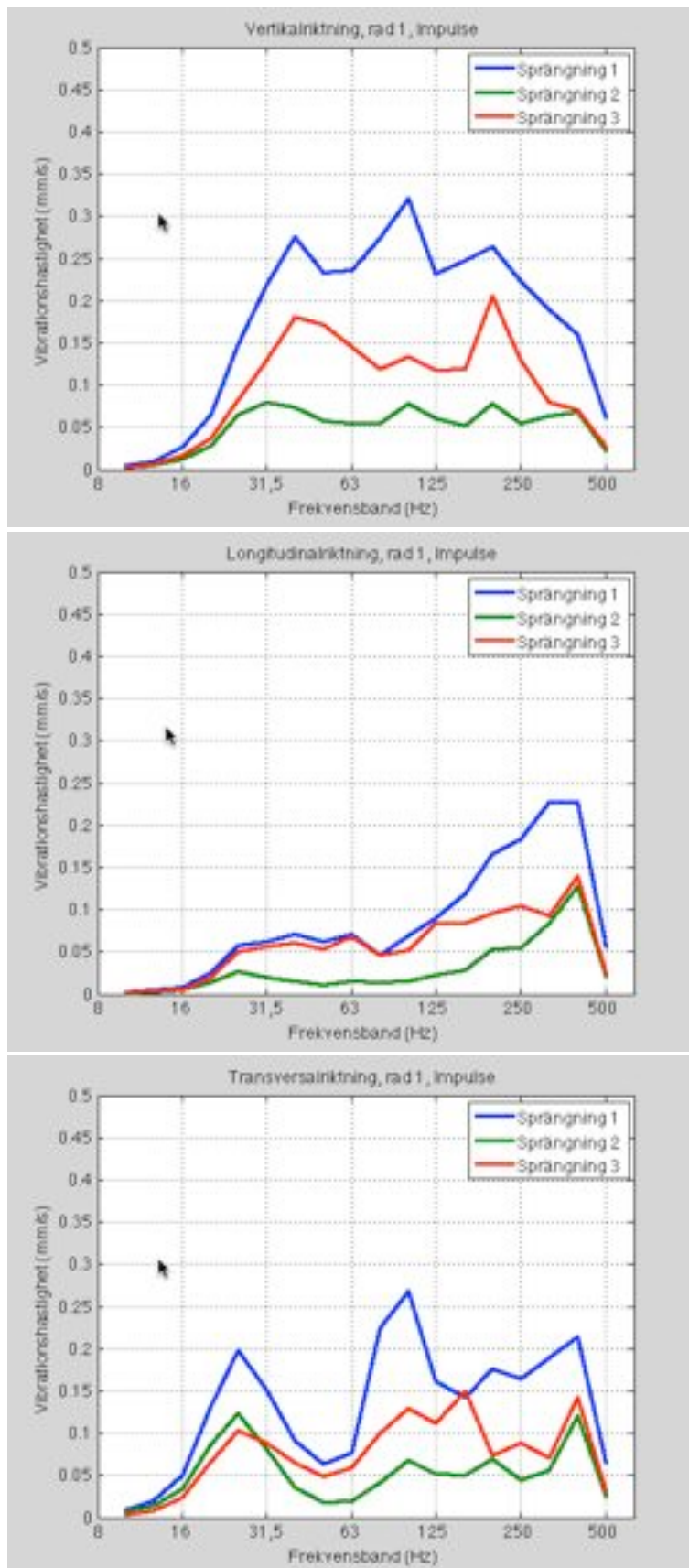
Motsvarande figurer för filtret med tre rader (steg 2 enligt figur 3.4) kan ses i figurerna 4.6 – 4.8. Vid de mätningarna blev sprängning 2 så svag att mätinstrumenten inte triggades för vissa positioner, se figur 4.8. Mätdata blev alltså inte komplett och är därför inte presenterat i figur 4.6 – 4.7.



Figur 4.6: Uppmätt transmissionskoefficient till första raden bakom markfiltret med tre rader för olika vibrationsriktningar.

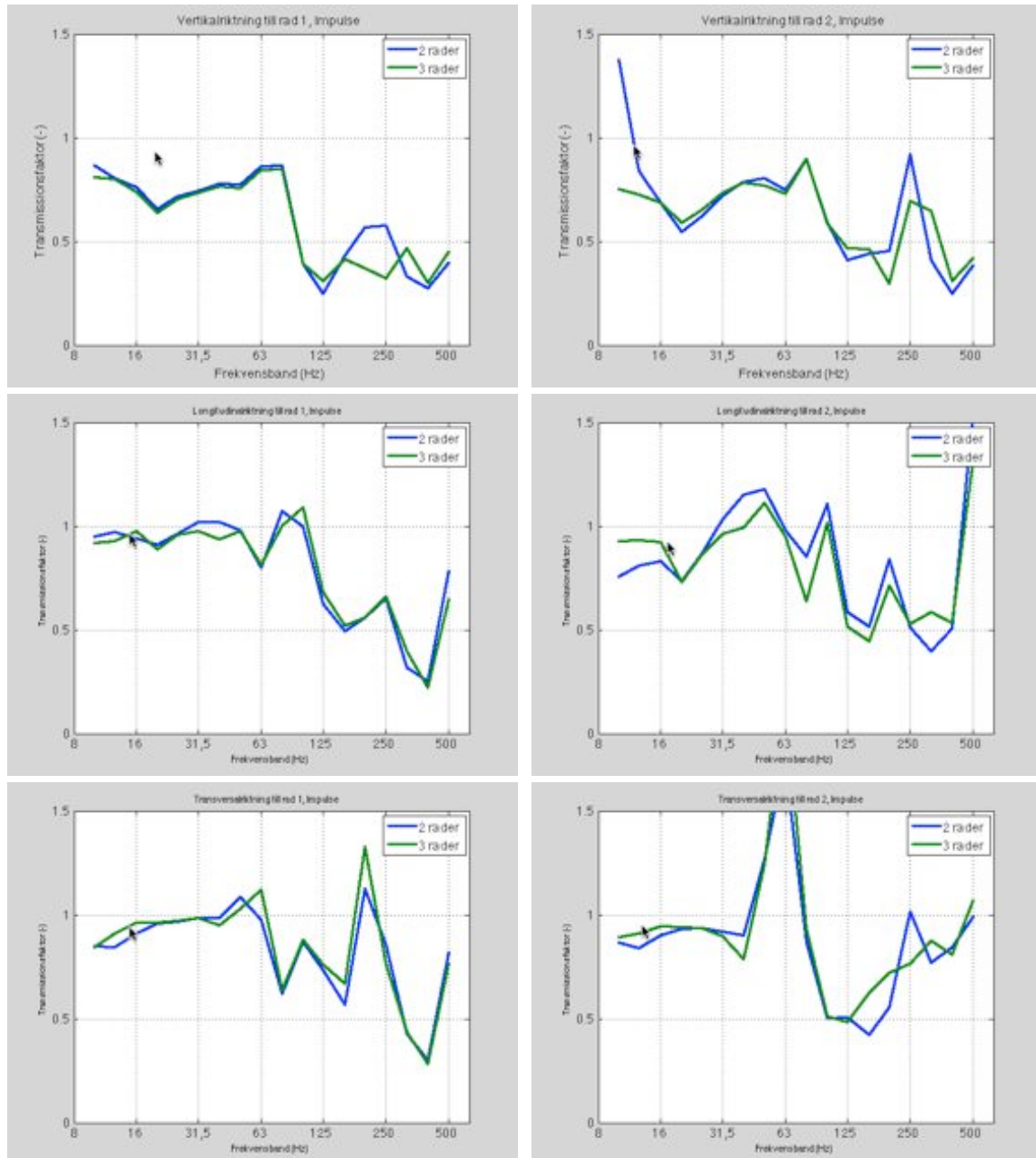


Figur 4.7: Uppmätt transmissionskoefficient till andra raden bakom markfiltret med tre rader för olika vibrationsriktningar.



Figur 4.8: Uppmätta spektran för vibrationshastigheten framför markfiltret med tre rader för olika vibrationsriktningar.

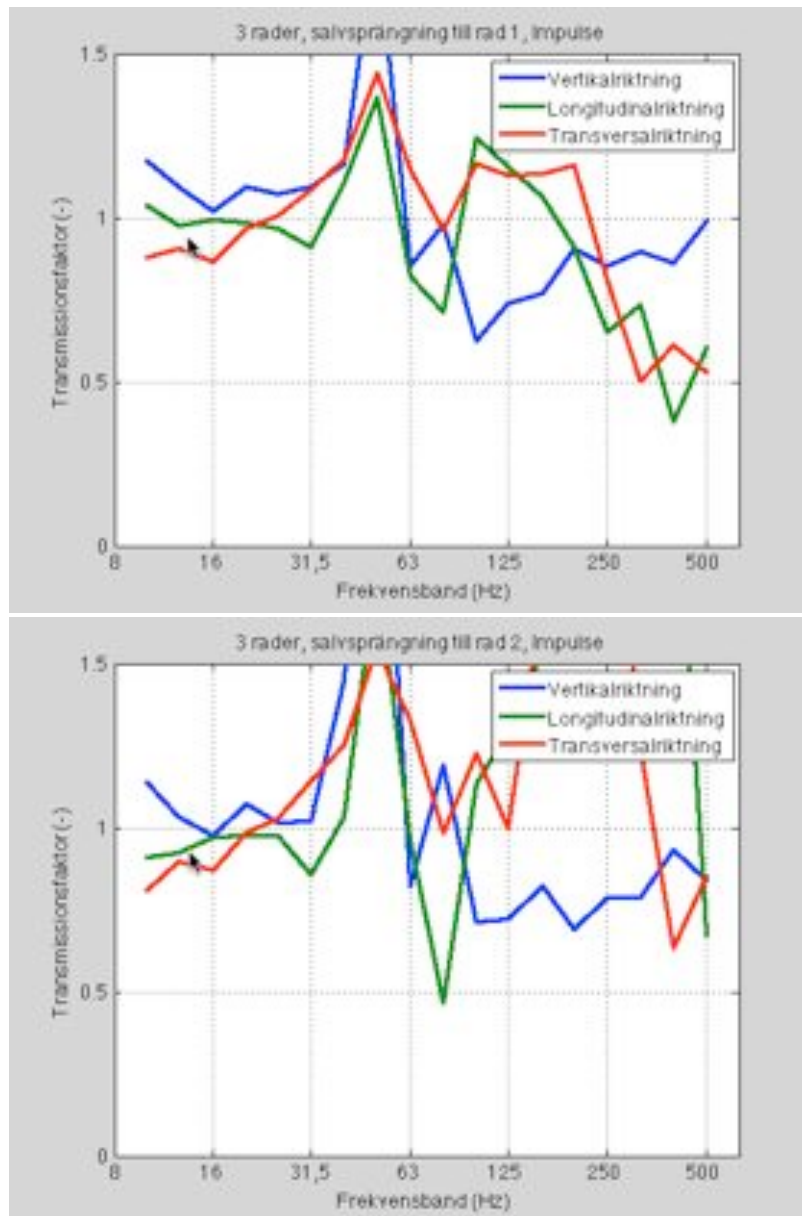
I figur 4.9 visas en jämförelse mellan filter med 2 och 3 rader. I den figuren kan man se att lägga till en tredje rad borrhål verkar påverka transmissionen av vibrationer i vertikal riktning, men att transmissionen av de andra två vibrationsriktningarna inte verkar påverkas alls. Slutsatsen av alla mätningar i Styvingetäkten är att 110 mm håldiameter inte fungerar som ett markfilter med multipel spridning vid frekvenser som är relevanta för bergtäkter. Möjligtvis kan vi spåra filtereffekter vid frekvenser ungefär vid 200 – 250 Hz, och för att få effekt vid lägre frekvenser behöver håldiametern ökas kraftigt.



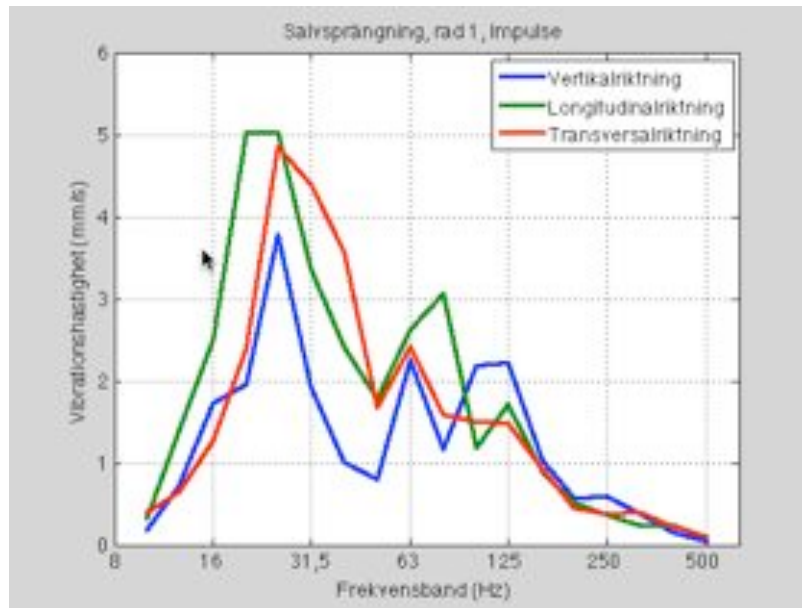
Figur 4.9: Uppmätt transmissionskoefficient till första respektive andra raden bakom markfilter med två respektive tre rader för olika vertikalriktningen.

För transversalvågorna syns en transmissionskoefficient betydligt över 1 vid 50 – 80 Hz för både två och tre raders filter. Troligtvis är detta skapat av en lokal effekt att vibrationshastigheten är låg framför markfiltret, som synes i diagrammet längst ner i figur 4.8.

Transmissionskoefficienten för filtret med tre rader mättes också för produktionssalva. I figur 4.10 visas transmissionskoefficienten för alla tre vibrationsriktningarna för produktionssalvan. Sänkningarna i den vertikala vibrationshastigheten är inte lika stor för frekvensbanden över 100 Hz, och det är naturligt när man vibrationen är skapad av en stor ytkälla istället för en enkel punktkälla. I figur 4.10 ser man också att vissa frekvensband har transmissionskoefficient över 1, d v s att vibrationshastigheten är större bakom filtret än framför. I synnerhet gäller detta 50 Hz-bandet. Återigen är detta kopplat till att vibrationshastigheten är låg framför filtret, vilket syns tydligt i figur 4.11 där vibrationshastigheten för olika tredjedels oktavband framför filtret visas.



Figur 4.10: Uppmätt transmissionskoefficient till första raden (övre figuren) och andra raden (nedre figuren) bakom filtret vid produktionssalvan.



Figur 4.11: Uppmätt spektrum vid raden framför markfiltret för produktionssalvan för all vibrationsriktningar.

Den begränsade dämpningen för markfiltret kan delvis vara skapad av att produktionssalvan var placerad långt till sidan om filtrets mittaxel (som är markerad i figur 4.1). De faktiska positionerna för produktionssalvan och filtret presenteras i figur 4.12. En så sned placering av filtret relativt produktionssalvan gör att vibrationsvågorna inte skärmas bra av filtret, d v s markvågorna "smiter förbi" kanterna eller diffrakteras starkt till mätpositionerna bakom filtret. De ofördelaktiga positionerna skapades av att produktionssprängningens läge inte var känt när filtret borrades. Hade de framtida produktionssprängningarnas lägen varit ordentligt kända hade man kunnat placera filtret i ett mer gynnsamt läge. Man måste dock komma ihåg att högsta fokus för dessa mätningar, som är först i detta projekt, var för enkelskotten. Det var viktigast att studera filtrets effekt för en enkel sprängkälla, och filtrets borrarplan valdes för att hamna mellan två starka sprickzoner, se figur 3.3. Att dessutom få mätdata för filtret från en produktionssprängning var självklart positivt.

Alla erfarenheter om filtrets utformning, det praktiska utförandet och dess vibrationsegenskaper användes vid placeringen och utformningen av markfiltret i Glimmingen.



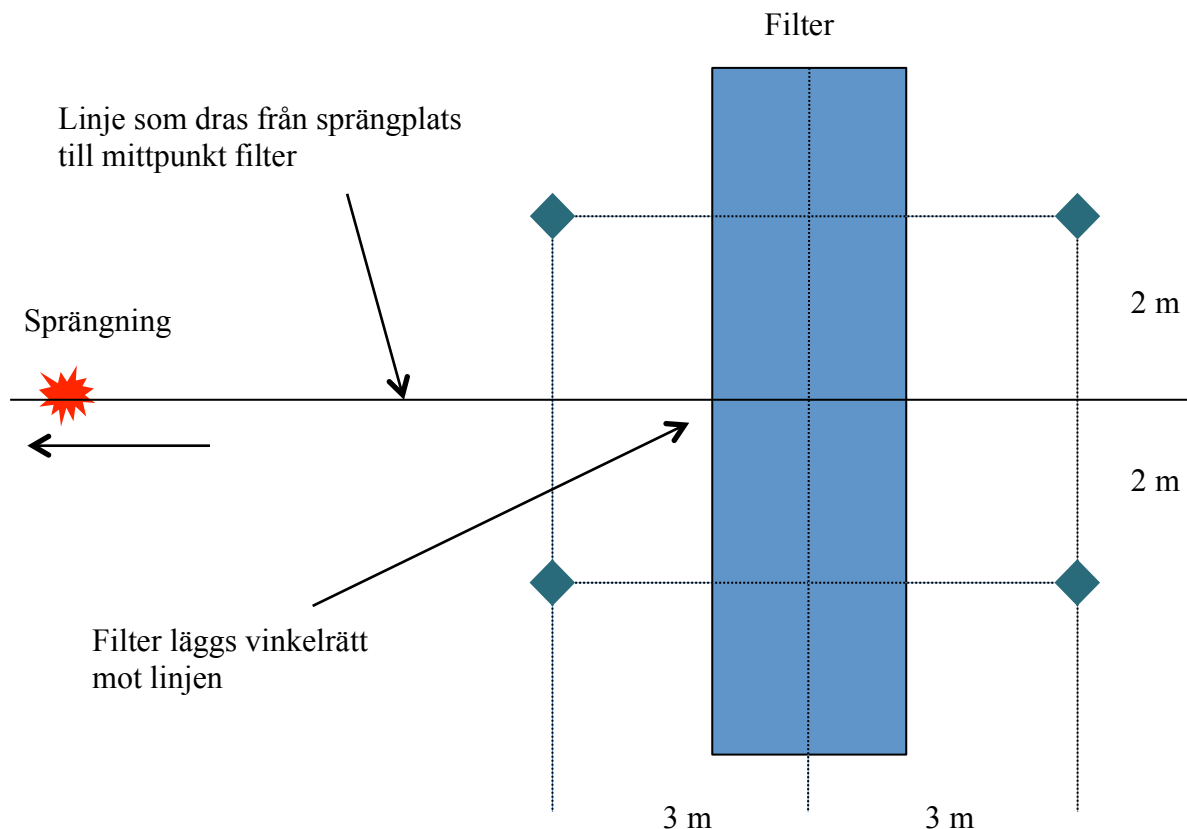
Figur 4.12: Faktiska positioner för markfilter, mätpositioner och produktionssalva vid mätningarna.

4.2 Glimmingen

I Glimmingen valdes att reducera antalet mätpunkter till fyra stycken; två punkter framför filtret och två bakom, se figur 4.13. Valet gjordes bland annat för att minimera kostnader, men också för att skillnaderna mellan den första och andra raden bakom filtret inte uppvisade några större skillnader. Projektet bedömde att man kunde få ut tillräcklig information om filtrets egenskaper med den minskade mängden mätpunkter.

En kritik som framkom mot mätutförandet i Styvinge var att man inte kunde göra en direkt jämförelse med och utan filter i samma mätpunkter. I Styvinge litade man istället på att avstånden mellan mätpunkterna skulle vara så små att några stora avståndseffekter inte skulle ses. Tyvärr blev avstånden betydligt kortare vilket medförde att vissa avståndseffekter uppkom, och detta ville man undvika i Glimmingen. Mätningar i de fyra mätpunkterna gjordes därför både innan något filter borrades över huvud taget, och sedan med två olika former av filter.

Återigen gjordes mätningar för både enkelskott med 1 kg booster på 4 m djup, och här gjordes tre enkelskott för varje konfiguration (utan filter, två raders filter samt för ett specialutformat filter). Dessutom mättes en produktionssprängning för varje konfiguration. Mätningarna innan första filtret konstruerades (referensmätning) gjordes 2015-03-25. Sedan borrades filtret med två rader och mätningar genomfördes 2015-06-01. Därefter konstruerades filtret med speciellt utformat mönster och de sista mätningarna genomfördes 2015-08-12. Alla mätningar gjordes på exakt samma sätt som i Styvinge, och det inspelade rådatat utvärderades också på samma sätt som för Styvinge-mätningarna.

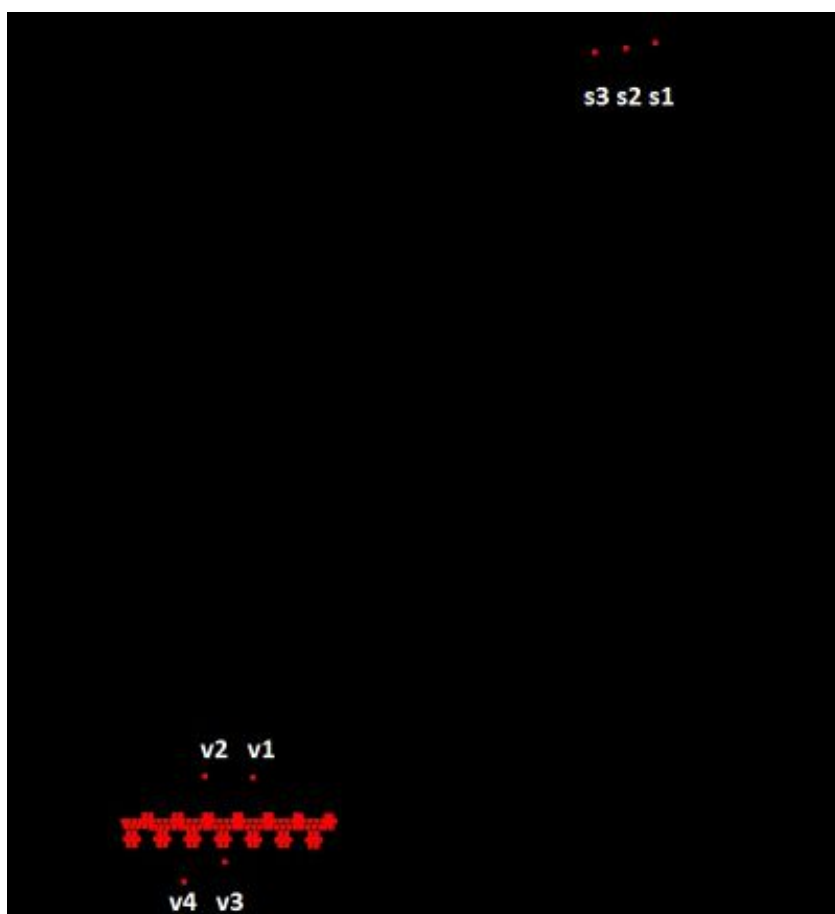


Figur 4.13: Placering av filter och mätpunkter i Glimmingen.

På grund av att berget var ojämnt kring området där filtret valdes att förläggas fick mätpositionerna justeras så att avståndet mellan filtret inte var konstant. Detta påverkar inte de slutliga mätresultaten av filtrets effektivitet allvarligt då vi i detta fall kan göra direkta jämförelser utan och med filter, d v s vi kan utvärdera filtrets insättningsdämpning. De slutliga mätpositionerna kan ses i figurerna 4.14 och 4.15 som visar hålsättning för produktionssalvorna tillsammans med hålen för enkelskotten och filtret.



Figur 4.14: Planritning över spränghål (till vänster) för de två salvorna samt de tre enkelskotten tillsammans med filtrets läge (till höger).



Figur 4.15: Detaljvy över de tre enkelskothållen s1-s3 tillsammans med filtret och de fyra mätpunkterna v1-v4.

De två filtrens effektivitet utvärderas genom att använda transmissionsfaktorn, detta på samma sätt som för Styvinge-resultaten. Skillnaden här är att vi nu kan utvärdera den direkta filtereffektiviteten för exakt samma mätpunkter. För att få jämförbara resultat måste man dock normera alla mätningar till samma vibrationsexponering i mätpunkterna innan filtret. Så här har vi gått tillväga i projektet:

1. Normera RMS-medelvärdet av vibrationshastigheterna i mätpunkterna innan filtret till det värde som var vid mätningen av specialmönstret (steg 2).
2. Beräkna det resulterande RMS-medelvärdet av vibrationshastigheterna i mätpunkterna bakom filtret genom att anta att berget är ett linjärt vibrationsmedium. Här används resultaten från punkt 1.
3. Jämför de normerade RMS-medelvärdena av vibrationshastigheterna i mätpunkterna bakom filtret. Detta ger transmissionsfaktorn

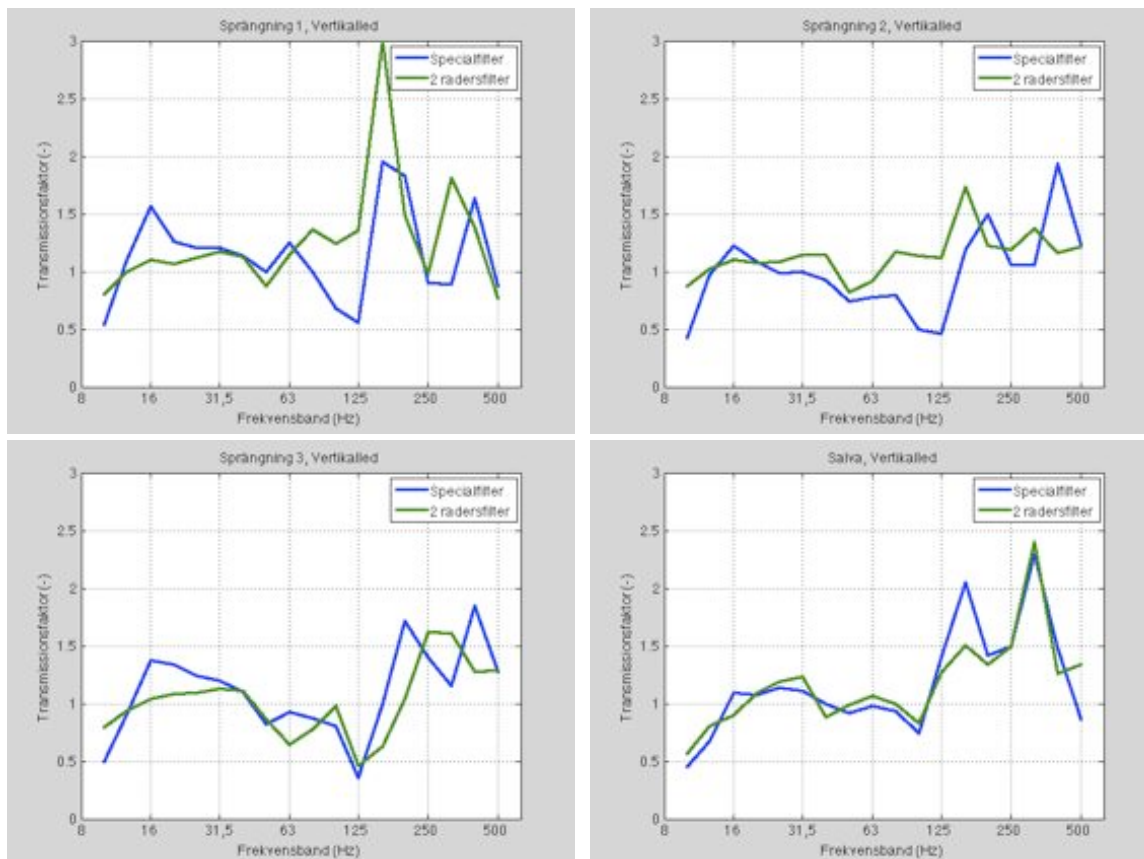
$$\tau = \frac{\tilde{v}_{\text{normerad med filter}}}{\tilde{v}_{\text{normerad utan filter}}}$$

Normeringen utfördes för de tre vibrationsriktningarna oberoende, vilket är en förenkling jämfört med den verkliga situationen där man har samtidiga och korspåverkande krafter som tillsammans resulterar i vibrationer i de tre riktningarna. En fysikaliskt korrekt normering kräver mycket data om själva vibrationsmediet samt är mycket komplicerad att genomföra, och därför valdes det förenklade sättet i detta projekt. Förenklingen orsakar inte att filtrets effektivitet blir felaktig. Sprängningen med specialfiltret användes som normeringsmål då den sprängningen gav högst vibrationsnivåer för produktionssalvan.

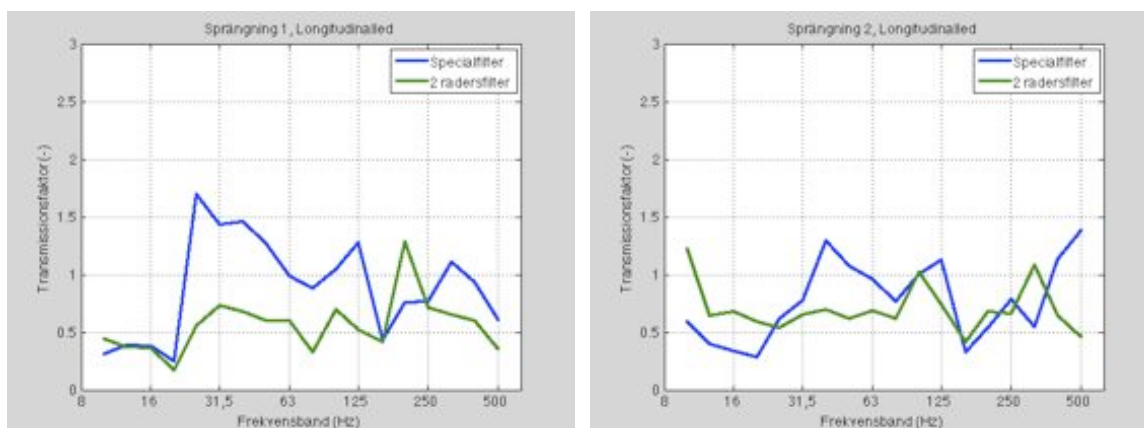
Figur 4.16 visar effektiviteten för filtret med två rader samtidigt med specialfiltret mot vibrationer i vertikalriktningen. I figuren finns det fyra separata grafer; tre för var och en av enkelskotten och en för produktionssalvan. Liknande figurer för longitudinalriktningen och transversalriktningen finns i figurerna 4.17 och 4.18 respektivet.

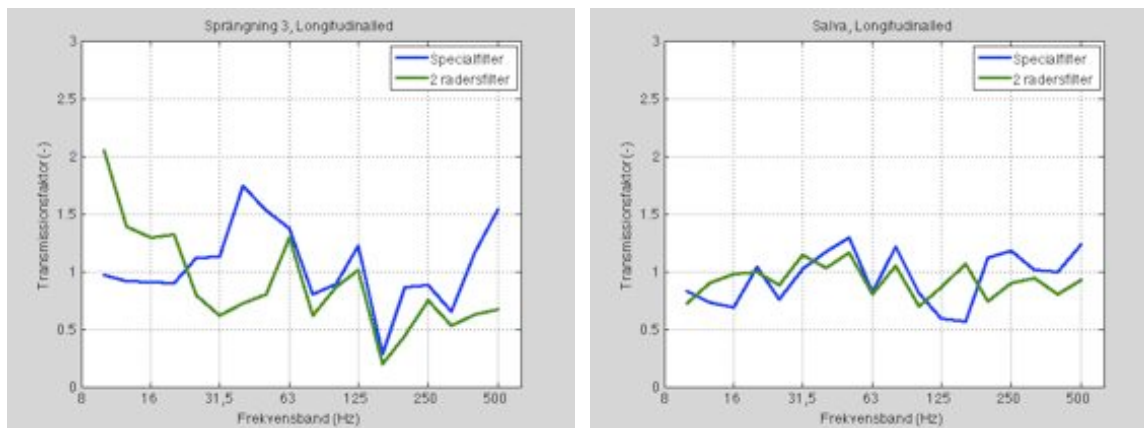
Den tydliga minskningen av vibrationshastigheten i vertikalled för frekvensband över 100 Hz som uppmättes i Styvinge, redan för filtret med två rader, kan inte ses i figur 4.16. Då filtret med två rader i Styvinge och Glimmingen är i princip identiska måste man därför dra slutsatsen att dämpningarna som uppmättes i Styvinge var, åtminstone delvis, orsakade av dämpningsprocesser i berget självt och inte av filtret. Den samlade slutsatsen för filtret med två rader måste tyvärr bli att det inte har någon märkbar effekt. Däremot verkar specialfiltret ha märkbar effekt runt 100 – 125 Hz där man kan se en bredbandig sänkning av vibrationshastigheterna i vertikalled, i alla fall för sprängning ett och två. För sprängning 3 verkar även filtret med två rader ha effekt, men den effekten finns enbart vid det enkelskottet och ingen annanstans. För salvsprängningen ser man betydligt mindre effekt, och det kan bero på att produktionssalvan inkluderade sprängning ned till 25 m djup. Detta gör att vibrationer kan diffrakteras in bakom filtret starkare än för enkelskotten som avfyrares på 4 m djup. På flygbilden i figur 4.14 ser man också att produktionssalvans geometriska bredd kan medföra för stark diffraktion även kring filtrets vertikala kanter.

Mätresultaten för longitudinal- respektive transversalriktningen är mer svårtolkade och enkelskotten visar på ömsom förstärkningar och dämpningar av vibrationerna. För salvsprängningarna visar dock effektiviteten på nära 1 i alla frekvensband, vilket innebär ingen påverkan. På den punkten stämmer mätresultaten med de från Styvinge.

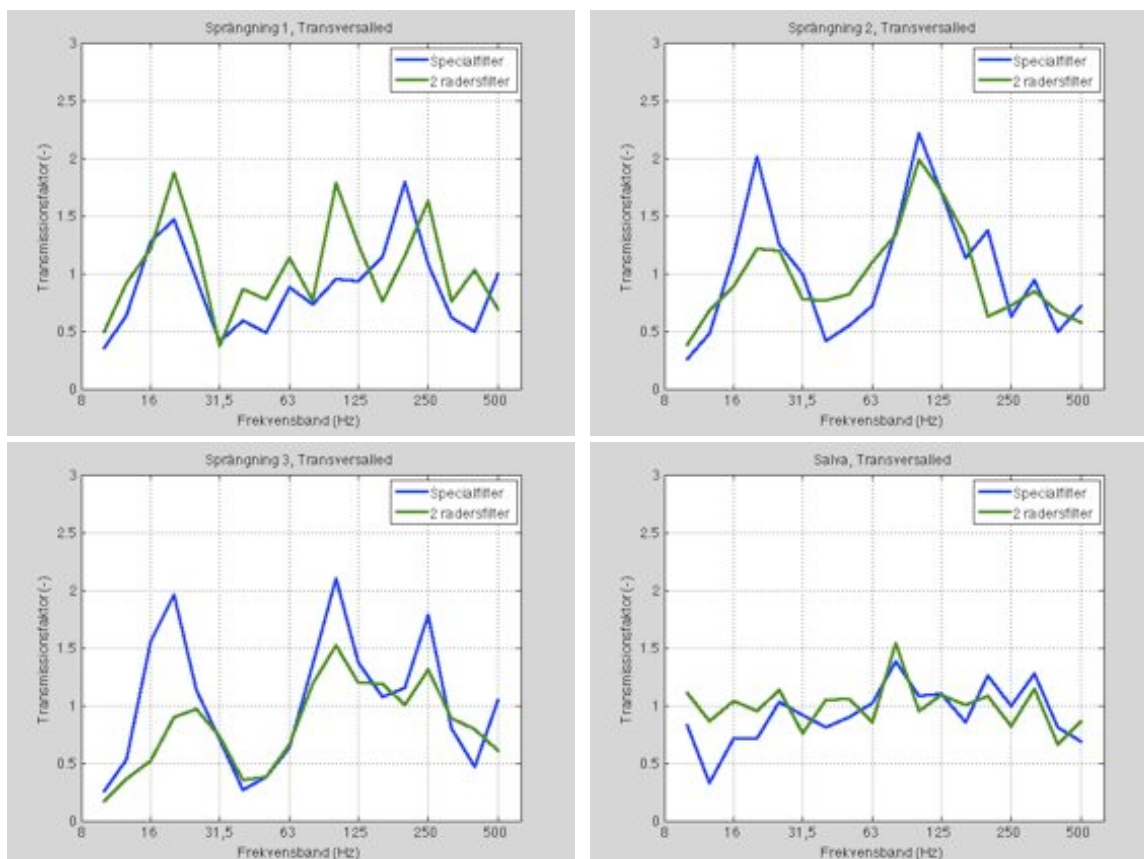


Figur 4.16: Effektivitet av markfiltret med två rader respektive specialfiltret för vibrationer i vertikallad.



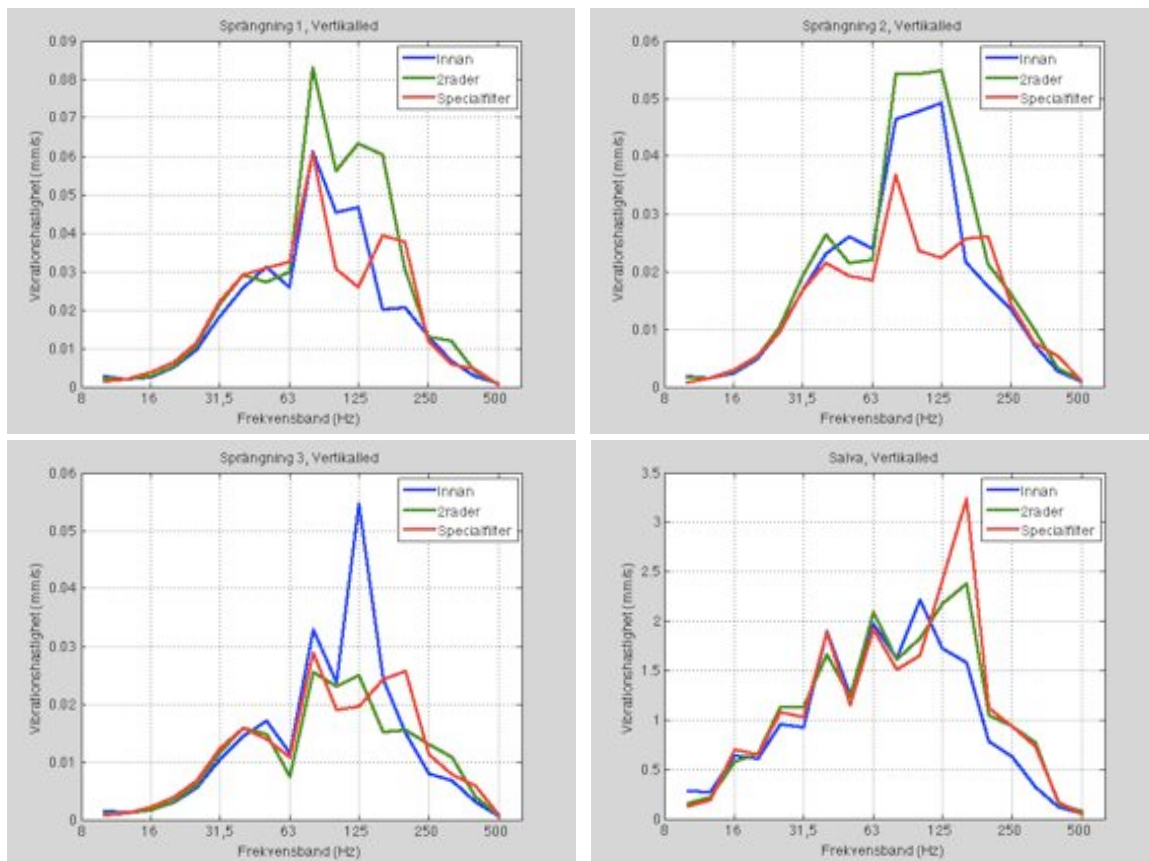


Figur 4.17: Effektivitet av markfiltret med två rader respektive specialfiltret för vibrationer i longitudinall.



Figur 4.18: Effektivitet av markfiltret med två rader respektive specialfiltret för vibrationer i transversall.

I figur 4.19 visas uppmätta vibrationsspektran som RMS-medelvärde i mätpunkterna innan markfiltret. Där är det tydligt att enkelskotten genererade bra signal till brusförhållanden i frekvensbanden mellan 20 och 400 Hz, d v s samma frekvensområde som i Styvinge. Produktionssalvan (grafen nere till höger i figuren) gav bra signal till brusförhållande i frekvensbanden mellan 16 och 315 Hz, d v s ungefär samma frekvensområde som enkelskotten.



Figur 4.19: Uppmätta vibrationshastigheter i vertikalriktningen för de olika konfigurationerna vid enkelskott samt produktionssalva.

Slutsatserna från försöken i Glimmingen är att man kan skapa ett filter som har dämpande effekt, i vilket fall på enkla sprängningar. Dock behöver man skapa ett designverktyg hur filtret ska dimensioneras vid praktisk användning. En översiktlig beskrivning av hur ett sådant designverktyg kan utformas finns i avsnitt 4.3.

4.3 Översiktlig beskrivning av designverktyg

För att kunna använda den här beskrivna metoden i praktiskt vibrationsdämpande arbete kring bergtakter kommer man behöva ta fram ett designverktyg. Designverktyget måste kunna ta hänsyn till alla lokala och platsspecifika variabler som påverkar vibrationsutbredningen mellan sprängning och vibrationsskänslig punkt. Variablerna som behövs kan vara:

- Placering av framtida produktionssprängningar relativt de omgivande vibrationsskänsliga punkterna. För att ett filter ska ha någon effekt måste det ligga på den raka linjen mellan varje spränghål och mottagarpunkt. Detta medför därmed indirekta krav på placering av filter, filterborrhålens djup samt filtrets sammanlagda bredd.
- Frekvensspektrumet vid den vibrationskänsliga punkten. Man måste ha relevanta data för vilka frekvensband som innehåller de högsta vibrationshastigheterna. För att få så god verkan av filtret som möjligt är det just de frekvensbanden med de högsta vibrationshastigheterna som man ska dämpa.
- Vågutbredningshastigheterna i berget. Man behöver veta hur höga utbredningshastigheterna är för det lokala berget. Detta eftersom filtret dimensioneras

utifrån vibrationernas våglängd, och våglängderna hänger direkt ihop med vågutbredningshastigheten.

Ett examensarbete på avdelningen för Teknisk akustik, Chalmers tekniska högskola, har initierats där man ska studera ovanstående variablers påverkan på filtrets effektivitet. Examensarbetet skall genomföras med hjälp av beräknade vågutbredningar med hjälp av finit elementmetod (FEM). I en FEM-modell kan man på ett relativt enkelt sätt inkludera de nödvändiga fysikaliska vibrationseffekterna och därigenom skapa förutsättningar att utforma en designmodell.

5. Slutsatser

De utförda provningarna i verkliga miljöer visar på att det finns möjligheter att dämpa markvibrationer genom att skapa ett metamaterial som består av borrarade hål i berg. Störst effekt får man om man kan skapa tillräckligt stora hål jämfört med vibrationens våglängd så att multipel spridning mellan hål uppstår, vilket i sin tur skapar destruktiv interferens i gynnsamma fall. Genom att välja rätt geometri, d v s håldiameter och borrarplan, kan man välja vilka frekvenser där vibrationen ska reduceras.

I de praktiska försöken som genomförts i detta projekt har det visats att man kan simulera stora hål genom att borra mindre hål tätt samman inom en cirkel. Detta är ett mycket viktigt resultat då de relevanta våglängder i bergtäktsammanhang är långa, vilket kräver stora håldiametrar. De simulerade stora hålen i Glimmingen visade på en potentiell dämpning av vertikala vibrationshastigheter med omkring 50 % i frekvensbanden 100-125 Hz. Detta är stora sänkningar som bör undersökas vidare om de kan realiseras praktiskt vid befintlig bergtäkt. Vid bostäder som ligger nära bergtäkter är det vanligt att vibrationshastigheterna har högst värden vid ca 30 – 40 Hz, vilket medför att de simulerade hålen skall vara 2 – 3 gånger större än de som borrades i Glimmingen. Detta medför grupperingar av borrhål inom cirklar som är omkring 3 m i diameter.

Vidare visade de praktiska försöken att effektiviteten av ett sådant filter måste utvärderas med mätningar i samma punkter före och efter ett filter har konstruerats. Annars finns risk att man attribuerar vågdämpnings- och eventuella vågförstärkningseffekter som sker i berget till filtret. Kort sagt, filtrets effektivitet utvärderas felaktigt.

Innan metoden med markfilter av borrhål kan användas som ett praktiskt hjälpmedel att minska markvibrationer kring bergtäkter måste ett designverktyg skapas som kan hantera alla platsspecifika variabler som:

- Val av frekvensband som ska dämpas
- Placering, längd och borrhåldjup för filter
- Geometrin mellan bergtäkt, produktionssprängningar samt bostad som behöver skyddas

Referenser

Alagoz, B. B. och Alagoz, S. (2011). Towards earthquake shields: A numerical investigation of earthquake shielding with seismic crystals, *Open Journal of Acoustics*, 63-69.

Brulé, S., et al., *Seismic metamaterial: How to shake friends and influence waves* (2013) arXiv.org > physics > geophysics, <http://arxiv.org/abs/1301.7642>
<http://www.physicscentral.com/explore/action/cloaking-earthquakes.cfm>

Brulé, S, Javelaud, E H, Enoch, S och Guenneau, S (2014). Experiment on seismic metamaterials: Molding surface waves. *Physical Review Letters* 112, 133901.

Congshi W, Gang L och Dianguang, Y (2015). A study on vibration isolation effect of damping holes in excavation blasting. *Lyon Conference Proceedings 2015, European Federation of Explosives Engineers*.

Deymier, P (ed) (2013). *Acoustic metamaterials and phononic crystals*. Springer series in Solid state sciences 173.

Di Mino, G., Giunta, M. och Di Liberto, C. M. (2009). Assessing the open trenches on screening railway ground-borne vibrations by means of artificial neural network. *Advances in Acoustics and Vibration* v 2009, article ID 942787.

Massarsch, K. M. (2005). Vibration isolation using gas-filled cushions. *Soil Dynamics Symposium in Honor of Professor Richard D. Woods*: pp. 1-20, doi: 10.1061/40780(159)7.

Meseguer, F., Holgado, M., Caballero, D., Benaches, N., Sánchez-Dehesa, J., López, C., Llinares, J. (1999). Rayleigh-wave attenuation by a semi-infinite two-dimensional elastic-band-gap-crystal. *Physical Review B*, vol 59, nummer 19, sid 12169-12172.

Möller, B. et al (2000). *Geodynamik i praktiken*, SGI Information 17, Linköping.

Peterson, B. och Ström, S. (1974). T-matrix formulation of electromagnetic scattering from multilayered scatterers. *Physical Review D* vol 10.

RTC Rock Tech Center, *Guideline avseende vibrationer inomhus orsakade av sprängningsinducerade vibrationer och luftstöt vågor. Mätmetod och begränsningsvärden för komfort*, 2010.

Sang-Hoon Kim and Mukunda P. Das, *Seismic Waveguide of Metamaterials*, *Mod. Phys. Lett. B* 26, 1250105 (2012), <http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0217984912501059>

Taherzadeh, S., et al., *Aperiodicity effects on sound transmission through arrays of identical cylinders perpendicular to the ground*, *Acoustical Society of America*, 132, EL323 (2012)

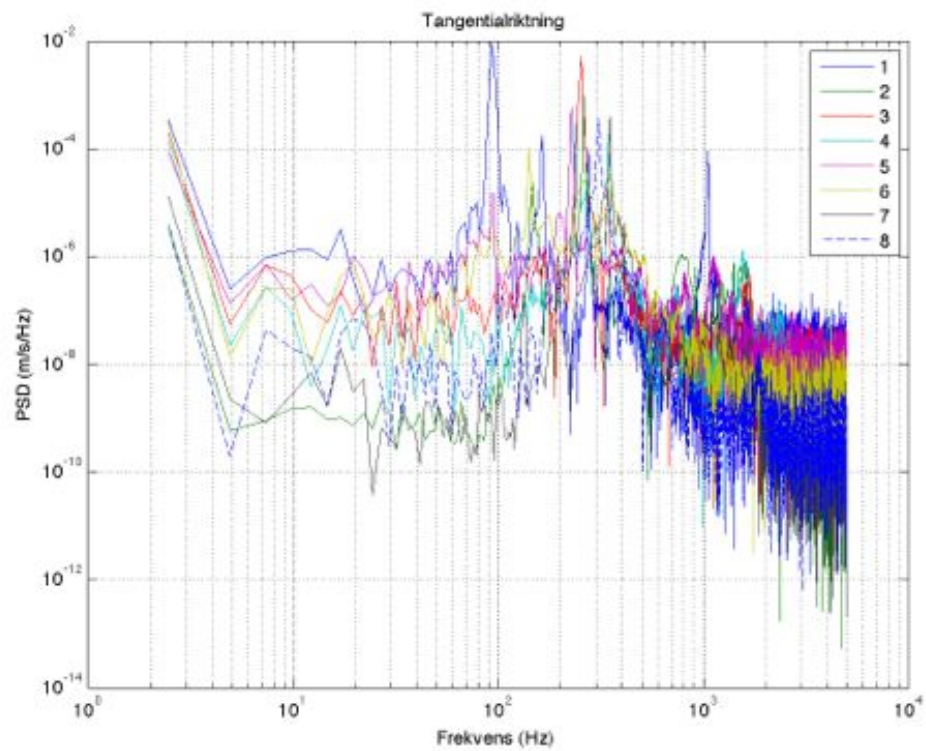
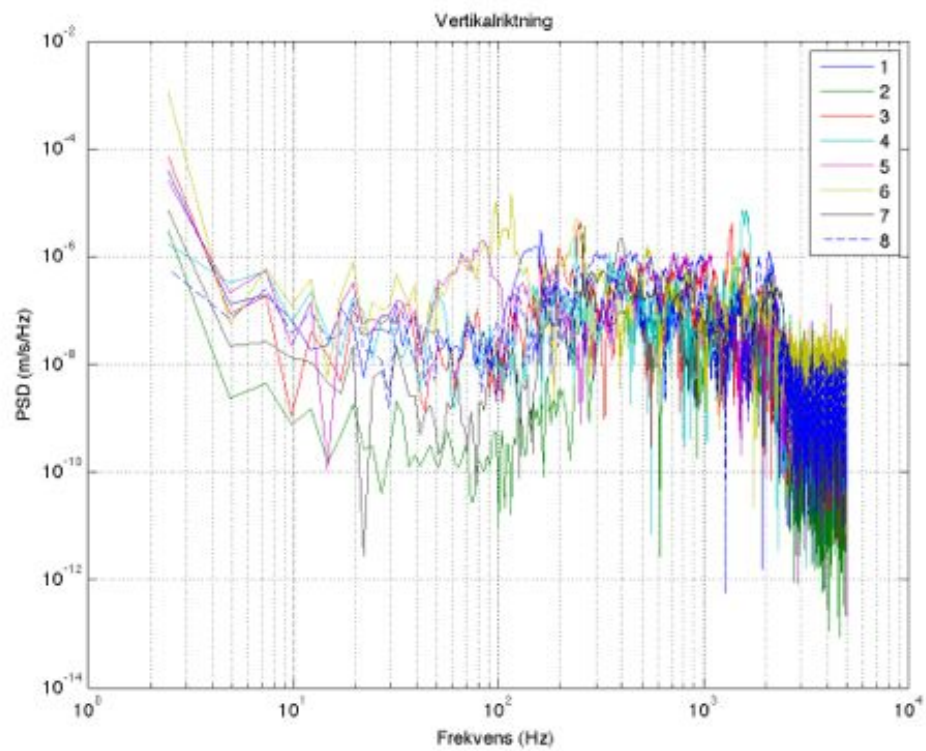
Twersky, V. (1960). On multiple scattering of waves, *J. Res. Natl. Bur. Stand.* D64, 1960.

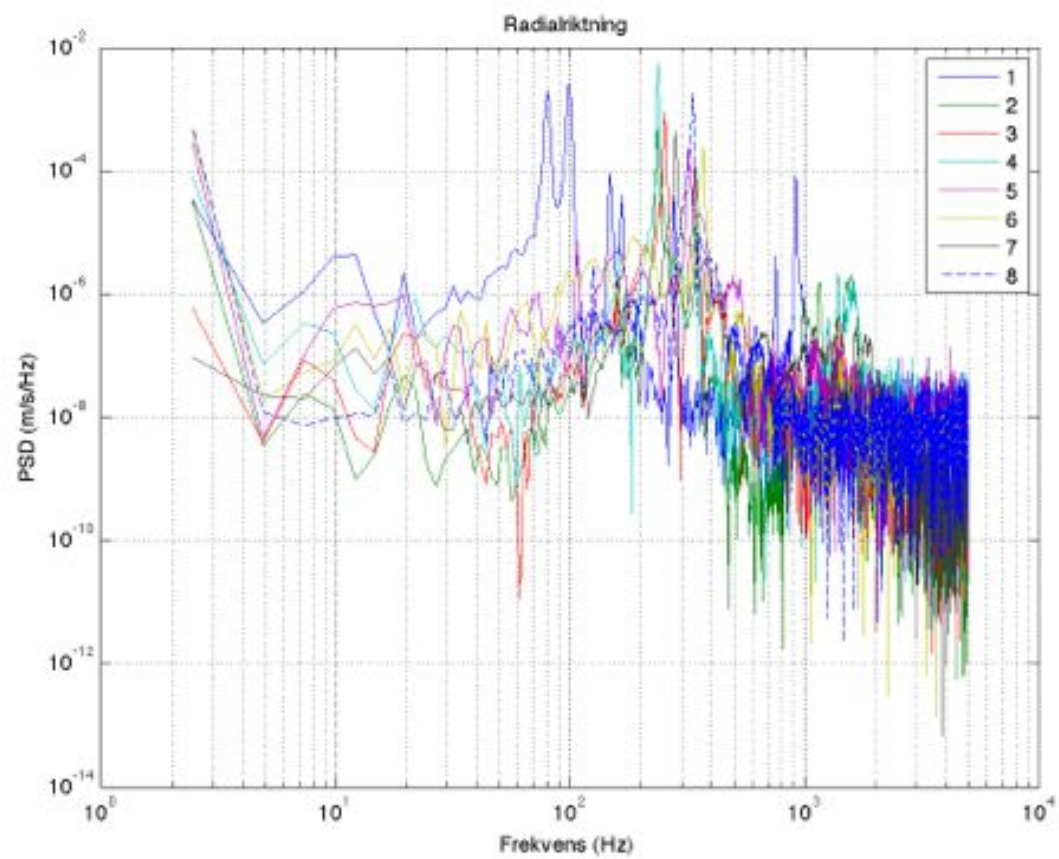
Waterman, P. C. (1969). New formulation of acoustic scattering. *Journal of the Acoustical Society of America* vol 45.

Wolfe, J. (1998)., *Imaging Phonons*, New York: Cambridge University Press, 1998.

Záviska, F. (1913). Über die beugung elektromagnetischer Wellen an parallelen, unendlich langen Kreiszylindern, Annalen der Physik 4.

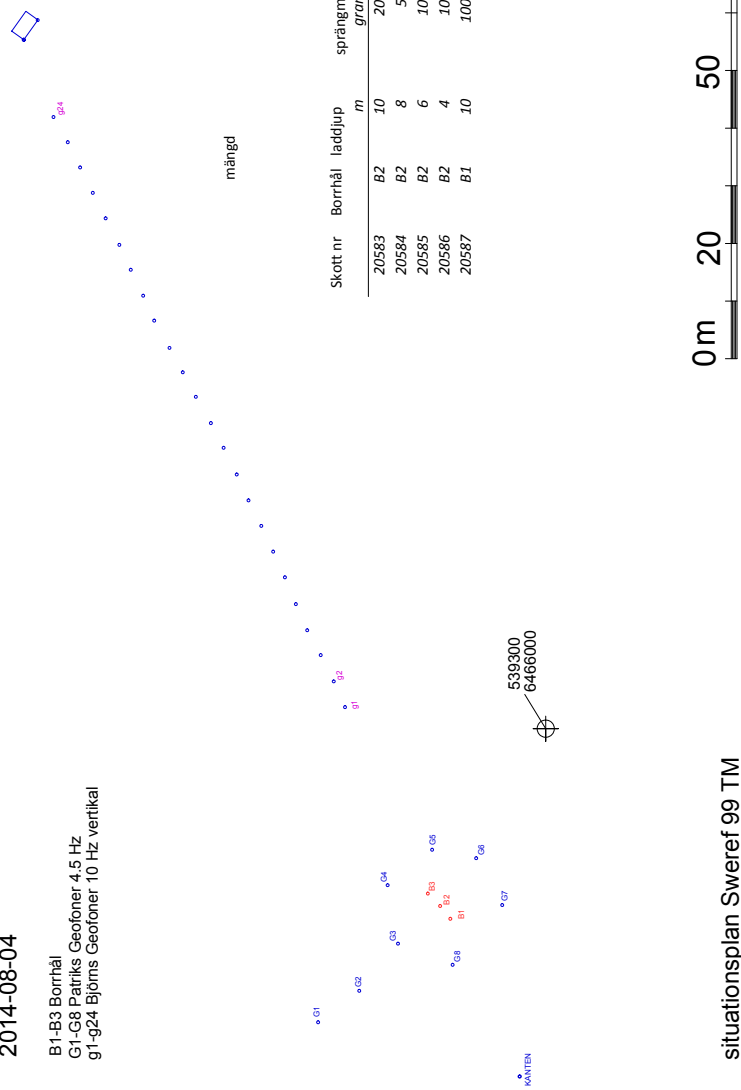
Bilaga 1: Styving mätpositioner testskott





Styvinge Bergtäkt
vibrationsmätning vid "enkelskott"
situationsplan
2014-08-04

B1-B3 Borrhål
G1-G8 Patriks Geofoner 4.5 Hz
g1-g24 Björns Geofoner 10 Hz vertikal



Skott nr	Borrhål	laddlup	sprängm. gram	mät-punkt geofon
20583	B2	10	200	g1-g24
20584	B2	8	50	G1-G8
20585	B2	6	100	G1-G8
20586	B2	4	100	G1-G8
20587	B1	10	1000	G1-G8

situationsplan Sweref 99 TM

Styvinge Bergtäkt
2014-09-04
"enkelskott"

PROJEKTANT: B. TILJ
PROJEKT: styv1
REVISYON: 1-1500
REVISYON: 1-1500